

VISIT...

LANZAROTE  
*Caliente*.COM

В. Е. КИТАЕВ, Ю. М. КОРХОВ, В. К. СВИРИН

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## Часть II

# МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Под редакцией проф. В. Е. Китаева

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов электромеханических специальностей техникумов



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1978

ББК 31.261

К45

УДК 621.313 (075)

Рецензенты:

*Г. К. Салгус (МЭИ);*

Новочеркасский электромеханический техникум

**Китаев В. Е., Корхов Ю. М., Свирин В. К.**

**К45 Электрические машины. Ч. II. Машины переменного тока:**  
**Учеб. пособие для техникумов/ Под ред. В. Е. Китаева. —**  
**М.: Высш. школа, 1978. — 184 с., ил.**

40 к.

В книге содержатся сведения по теории электрических машин и трансформаторов, их принцип действия, устройство и конструкции; рассматриваются физические процессы, происходящие при работе электрических машин и трансформаторов; устанавливаются количественные связи между величинами, характеризующими эти процессы.

*Предназначается для студентов электромеханических специальностей техникумов. Может быть полезна инженерам и техникам, занимающимся вопросами теории, конструирования и эксплуатации электрических машин.*

К 30307—427  
001(01)—78 220—78

**ББК 31.261**

**СП2.1.081**

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## Глава 17

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
И ИХ УСТРОЙСТВО

## § 17.1. Общие сведения

Наиболее широкое распространение получили машины переменного тока — синхронные и асинхронные. Любая электрическая машина переменного тока состоит из двух основных частей — неподвижной части, называемой *статором*, и вращающейся части, называемой *ротором*. Между статором и ротором имеется воздушный промежуток, или зазор, величина которого оказывает очень существенное влияние на рабочие свойства машины. Так, например, в машинах постоянного тока и синхронных воздушный зазор делают сравнительно большим, так как его увеличение в машинах постоянного тока уменьшает пульсацию напряжения, а в синхронных машинах повышает перегрузочную способность. В асинхронных машинах увеличение воздушного зазора резко уменьшает коэффициент мощности и вращающий момент машины. Поэтому в асинхронных машинах воздушный зазор всегда небольшой — 0,2—3 мм.

Сердечник статора собирают из стальных листов в виде колец, на внутренней окружности которых штампуют впадины или пазы для укладки обмотки статора. Стальные листы изолируют друг от друга лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи. Сердечник статора с обмоткой помещают в станину, посредством которой машина крепится на фундаменте и транспортируется.

Устройство статора и его обмотки у синхронной и асинхронной машин одинаково. Пазы могут быть открытыми (а), полузакрытыми (б) и закрытыми (в) (рис. 17.1). Открытые пазы делают в машинах постоянного тока и в синхронных машинах на роторе при явнополюсной их конструкции. При открытых пазах легко выполнять шаблонную обмотку, что уменьшает ее стоимость. Однако при такой форме паза магнитное поле в воздушном зазоре распределяется неравномерно. Закрытые пазы выполняют для короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей, для пусковых и демпферных (успокоительных) обмоток синхронных машин. При такой форме паза неравномерность распределения магнитного поля исключается, но выполнение обмотки значительно сложнее — методом протяжки, т. е. провод протягивают через изоляционную гильзу в пазу. С полузакрытыми пазами статора машин переменного

тока выполняются наиболее часто. Обмотка здесь может быть по-шаблонной, т. е. предварительно заготовленной на шаблоне в виде мягких катушек, витки которых вкладывают или «всыпают» по-одному через прорезь паза.

Устройство ротора и его обмотки у синхронной и асинхронной машин различное. Рабочий процесс в машинах протекает под действием вращающегося магнитного поля, создаваемого намагничивающей силой (н. с.) симметричной трехфазной обмотки статора. При этом в синхронных машинах процесс преобразования энергии происходит при синхронной частоте, т. е. при частоте вращения ротора, равной частоте вращающегося поля статора, тогда как

в асинхронных машинах обратное — при работе частота ротора не может быть равной частоте вращающегося поля (асинхронная скорость).

Как и любая электрическая машина, синхронные и асинхронные машины обладают свойством обратимости, т. е. могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Синхронные генераторы являются основным

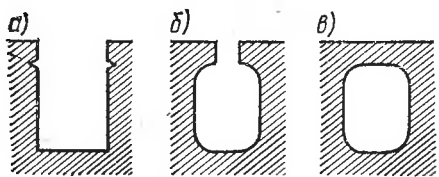


Рис. 17.1. Формы пазов электрических машин

источником электрической энергии, вырабатываемой на электростанциях. Вся электрическая энергия, необходимая для нужд народного хозяйства, производится трехфазными синхронными генераторами. Синхронные двигатели находят менее широкое применение. Их достоинство — высокий коэффициент мощности ( $\cos \phi$ ), возможность потреблять опережающий ток из сети, компенсируя реактивную мощность, потребляемую другими приемниками энергии, включенными в эту сеть. Поэтому применение синхронных двигателей целесообразно при сравнительно больших мощностях с тем, чтобы они работали с потреблением опережающего тока из сети и компенсировали реактивную мощность других потребителей, повышая  $\cos \phi$  всего предприятия. Кроме того, постоянство частоты вращения делает целесообразным применение синхронных двигателей в случаях, когда необходима жесткая скоростная характеристика (звуковое кино, проигрыватели и др.).

Асинхронный двигатель, изобретателями которого были Тесла и Доливо-Добровольский, — наиболее распространенный тип электрических машин. Простота конструкции, экономичность и высокая надежность в работе асинхронных двигателей обусловили их широкое применение в различных отраслях промышленности. Эти двигатели изготавливают на различные мощности в пределах от нескольких ватт до нескольких тысяч киловатт. Особенно велика потребность в трехфазных асинхронных двигателях мощностью 0,4—100 кВт. Асинхронные генераторы почти не находят практического применения, так как обладают рядом существенных недостатков —

не вырабатывают реактивной мощности, не обеспечивают постоянства частоты индуктируемой э. д. с.

Помимо двух основных режимов работы — генератора и двигателя — синхронные и асинхронные машины используют в специальных режимах работы. Синхронные машины работают компенсатором, вырабатывая только реактивную мощность, асинхронные машины — в режиме электромагнитного тормоза, преобразователя частоты и др. Синхронные и асинхронные машины делают в основном трехфазными, но применяют и однофазные. Помимо синхронных и асинхронных машин применяются коллекторные машины переменного тока, рабочие свойства которых подобны рабочим свойствам машин постоянного тока.

## § 17.2. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

Сердечники статоров и роторов асинхронных машин собирают из стальных листов, изолированных друг от друга для уменьшения потерь на вихревые токи. В пазах статора и ротора размещают

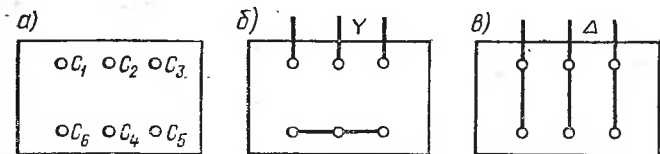


Рис. 17.2. Вывод начал и концов фаз обмотки статоров на щиток (а), расположение перемычек для включения обмотки статора в сеть звездой (б) и треугольником (в)

проводники обмоток. Статор крепят в станине, а ротор — на валу машины. Начала  $C_1, C_2, C_3$  и концы  $C_4, C_5, C_6$  трехфазной обмотки статора выводят на щиток машины и располагают таким образом (рис. 17.2, а), чтобы обмотку статора было удобно соединить звез-

дой  (рис. 17.2, б) или треугольником  $\Delta$  (рис. 17.2, в).

Это дает возможность каждую машину использовать в сетях с двумя различными напряжениями (например, при 127 и 220 В или 220 и 380 В и др.). Поэтому в паспорте машины и на щитке указаны два значения напряжения сети, при которых может работать машина (220/127; 380/220 В и др.). Для включения в сеть с большим из указанных напряжений обмотка статора соединяется звездой, а меньшим напряжением — треугольником. В двигателях последних серий не делают щитков для зажимов, а выпускают шесть выводных маркированных концов:  $C_1, C_2, C_3$  — начала и  $C_4, C_5, C_6$  — концы фаз.

В зависимости от типа обмотки ротора асинхронные машины могут быть с короткозамкнутым и с фазным ротором.

В настоящее время асинхронные двигатели изготавливают преимущественно с короткозамкнутым ротором и лишь при больших мощностях и в специальных случаях используют фазную обмотку ротора. Обмотку короткозамкнутого ротора изготавливают в виде беличьего колеса из стержней 1, уложенных в пазы сердечника и замкнутых между собой на торцовых сторонах накоротко кольцами 2 (рис. 17.3). Такую обмотку обычно изготавливают из алюминия, который в горячем состоянии под давлением заливают в пазы ротора. Вместе со стержнями отливают и замыкающие кольца, которые снабжают крыльями для улучшения вентиляции. На рис. 17.4 показано устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. В станине машины 1 укреплен сердечник статора 2 с обмоткой 4. Сердечник ротора 3 с обмоткой 5 жестко закреплены на валу машины.

Рис. 17.3. Короткозамкнутая обмотка ротора

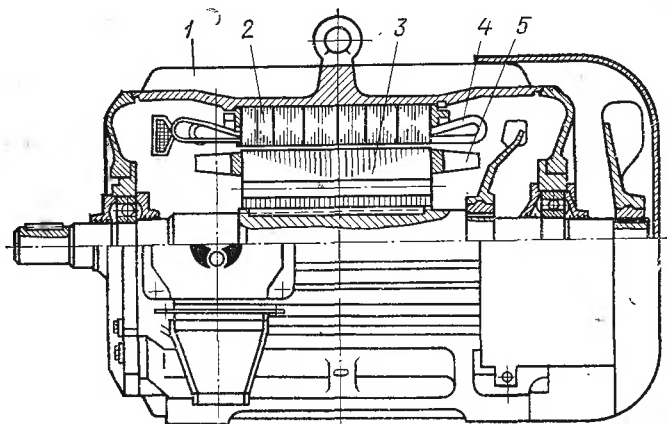


Рис. 17.4. Устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

У двигателей с фазным ротором (с контактными кольцами) в пазах ротора размещают трехфазную изолированную обмотку, подобную обмотке статора. Фазы обмотки ротора соединяют звездой, их начала подключают к трем контактными кольцам, помещенным на валу машины и изолированным как от вала, так и между собой. Эти кольца жестко укреплены на валу и вращаются вместе с ним. К кольцам через щетки при пуске двигателя или для регулирования частоты вращения присоединяют сопротивление (рео-

стат), что позволяет увеличивать полное сопротивление цепи обмотки ротора и уменьшить пусковые токи, увеличивая пусковой момент.

В асинхронном двигателе рабочий процесс может протекать только при частоте вращения ротора  $n_2$ , не равной частоте вращения магнитного поля  $n_1$ . Частота вращения ротора может очень мало отличаться от частоты поля, но при работе двигателя она будет всегда меньше ( $n_2 < n_1$ ). В этом заключается основное принципиальное отличие асинхронных машин от синхронных, у которых частота вращения ротора всегда равна частоте вращения магнитного поля статора. Работа асинхронного двигателя основана на принципе электромагнитной индукции. Вращающееся магнитное поле, возбуждаемое токами в обмотке статора, пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в этой обмотке э. д. с. Если обмотка ротора замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, то в ней под действием индуцируемых э. д. с. возникнут переменные токи, взаимодействие которых в обмотке ротора с магнитным полем обмотки статора создает вращающий момент, приводящий ротор во вращение. Направление всякого индуцированного тока таково, что он противодействует причине, его вызвавшей. Поэтому токи в проводах обмотки ротора стремятся задержать вращающееся поле статора, но, не имея возможности сделать это, приводят ротор во вращение так, что он следует за полем статора.

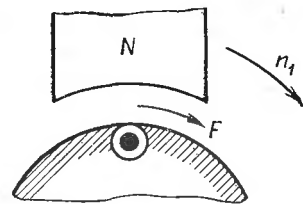


Рис. 17.5. Принцип работы асинхронного двигателя

На рис. 17.5 выделена часть окружности ротора, на которой находится один проводник его обмотки. Поле статора условно представлено северным полюсом  $N$ , который перемещается в пространстве и вокруг ротора по часовой стрелке с частотой  $n_1$ . Следовательно, полюс  $N$  перемещается относительно проводника обмотки ротора слева направо, в результате чего в этом проводнике индуцируется э. д. с., направление которой может быть определено по правилу правой руки и показано на рисунке знаком точки. Если обмотка ротора замкнута, то под действием э. д. с. по этой обмотке возникает ток, направленный в выбранном нами проводнике так же, как и э. д. с. В результате взаимодействия тока в проводнике обмотки ротора с магнитным полем возникает сила  $F$ , которая перемещает проводник в направлении, определяемом по правилу левой руки. Вместе с проводником начинает перемещаться и ротор. Если силу  $F$  умножить на расстояние этого проводника от оси ротора (плечо приложения силы), то мы получим вращающий момент, развиваемый током данного проводника. Так как на роторе помещено большое количество проводников, то сумма произведений сил, действующих на каждый из проводников, на расстоянии этих проводников от оси ротора определяет вращающий момент, развиваемый двигателем. Под действием вращающего момента ротор вращается в направлении вращения магнитного поля.



Для реверсирования двигателя, т. е. для изменения направления вращения ротора, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, созданного обмоткой статора. Это достигается в трехфазных двигателях изменением чередования фаз обмоток статора, для чего следует поменять местами включение двух любых из трех проводов, подключающих машину к сети. Реверсивные двигатели снабжены переключателями, при помощи которых можно изменять чередование фаз обмоток статора, а следовательно, и направление вращения ротора. Вне зависимости от направления вращения ротора его частота  $n_2$ , как уже упоминалось, всегда меньше частоты магнитного поля статора. Если бы эти частоты почему-либо оказались одинаковыми, то магнитное поле статора не пересекало бы проводников обмотки ротора и, следовательно, в них не возникали бы токи, т. е. не было бы и вращающего момента.

### § 17.3. Принцип действия и устройство синхронных машин

Магнитное поле в синхронной машине создается постоянным током, протекающим по обмотке возбуждения. Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения — очень существенный недостаток синхронных машин.

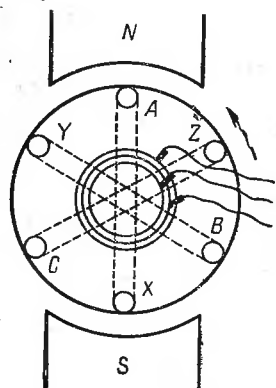


Рис. 17.6. Принцип действия синхронного генератора

Обычно обмотки возбуждения получают энергию от генератора постоянного тока параллельного возбуждения (возбудителя), находящегося на одном валу с основной машиной. Его мощность составляет 1—5% мощности синхронной машины. При небольшой мощности широко используются схемы питания обмоток возбуждения синхронных машин из сети переменного тока через выпрямители.

Принцип действия синхронного генератора основан на использовании закона электромагнитной индукции. На рис. 17.6 показана простейшая трехфазная обмотка, состоящая из трех катушек, сдвинутых на  $120^\circ$ , и помещенная на роторе (якоре). Катушки соединяют между собой в звезду или треугольник и подключают к трем контактными кольцам, на которых помещают неподвижные щетки. В катушках при вращении якоря индуцируются переменные во времени э. д. с., равные по амплитуде и сдвинутые по фазе на  $2\pi/3$ .

Современные синхронные генераторы изготавливают на линейное напряжение до 16 000 В (иногда и выше), изоляция контактных колец и щеток которых представляет собой большую сложность. Основным недостатком такой конструкции — наличие скользящего контакта в цепи основной мощности машины. Для его исключения

обмотку якоря, т. е. индуктируемую часть, помещают на статоре, а полюсную систему с обмоткой возбуждения — на роторе машины.

Обмотка возбуждения получает питание через контактные кольца. В этом случае скользящий контакт находится в цепи малой мощности и напряжение в цепи обмотки возбуждения относительно невелико (не более 500 В).

Статор синхронной машины имеет такое же устройство, как и статор асинхронной машины.

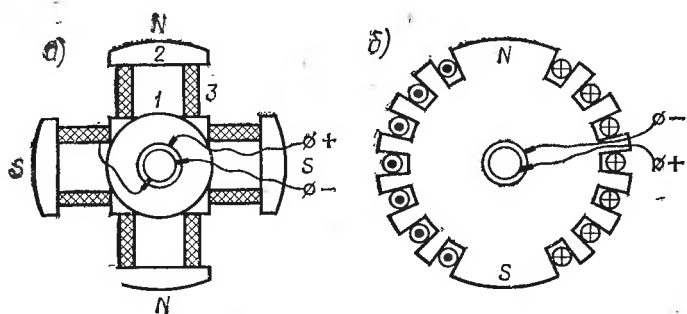


Рис. 17.7. Схема устройства ротора с явновыраженными (а) и неявновыраженными (б) полюсами

В зависимости от устройства ротора различают две конструкции синхронных машин:

- а) с явновыраженными полюсами;
- б) с неявновыраженными полюсами.

В машинах с относительно малой частотой вращения роторы выполняют с явновыраженными полюсами. На роторе (рис. 17.7, а) равномерно помещают явновыраженные полюсы, состоящие из полюсного сердечника 1, на котором расположена катушка обмотки возбуждения 3, удерживаемая полюсным наконечником 2. Такое устройство ротора облегчает выполнение обмотки возбуждения, но при большой частоте вращения не может быть использовано, так как не обеспечивает нужной механической прочности.

Поэтому при большой частоте вращения роторы выполняют с неявновыраженными полюсами (рис. 17.7, б). Такой ротор изготовляют в виде цилиндра, на части поверхности которого имеются пазы. В пазах укладывают проводники обмотки возбуждения, затем пазы заклинивают и лобовые соединения обмотки возбуждения стягивают стальными бандажами.

В зависимости от рода первичного двигателя, которым приводится во вращение синхронный генератор, последний называют *гидрогенератором* (первичный двигатель — гидравлическая турбина), *турбогенератором* (первичный двигатель — паровая турбина) и *дизель-генератором* (первичный двигатель — дизель). Гидрогенераторы — обычно тихоходные явнополюсные машины с большим числом полюсов, выполняемые с вертикальным расположением

вала. Турбогенераторы — быстроходные неявнополюсные машины, выполняемые в настоящее время двумя полюсами. Ротор современного турбогенератора делают из цельной стальной поковки. На части поверхности ротора выфрезерованы пазы для размещения обмотки возбуждения. Дизель-генераторы — явнополюсные машины с горизонтальным расположением вала.

Синхронные машины небольшой мощности (до 15 кВ·А) и невысокого напряжения (до 380/220 В) изготавливают с неподвижной полюсной системой и вращающимся якорем (подобно машинам постоянного тока). Синхронный двигатель не имеет принципиальных конструктивных отличий от синхронного генератора. На статоре двигателя помещают трехфазную обмотку, при включении которой в сеть трехфазного переменного тока создается вращающееся магнитное поле. На роторе двигателя размещают обмотку возбуждения, включаемую в сеть источника постоянного тока. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов. Вращающееся магнитное поле токов обмотки статора увлекает за собой полюсы ротора. При этом ротор может вращаться только с синхронной частотой, т. е. с частотой, равной частоте вращения поля статора. Таким образом, частота синхронного двигателя строго постоянна, если неизменна частота тока питающей сети.

Основное достоинство синхронных двигателей — возможность их работы с потреблением опережающего тока, т. е. двигатель может представлять собой емкостную нагрузку для сети. Такой двигатель повышает  $\cos \phi$  всего предприятия, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии.

Синхронные двигатели имеют меньшую, чем у асинхронных, чувствительность к изменению напряжения питающей сети. Вращающий момент у синхронных двигателей пропорционален напряжению сети в первой степени, тогда как у асинхронных — квадрату напряжения.

## Глава 18

### ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ИХ Э.Д.С.

#### § 18.1. Основные элементы обмоток машин переменного тока

В обмотке машины индуцируется э. д. с. В зависимости от назначения, мощности и условий работы машины переменного тока их обмотки имеют различные конструктивные формы. В настоящее время применяют следующие основные типы обмоток: катушечные, стержневые и специальные. Катушечные обмотки выполняют из изолированного медного провода круглого поперечного сечения; стержневые — из медных шин прямоугольного поперечного сечения; специальные обмотки применяют для короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей, для пусковых и успокоительных обмоток синхронных машин, для якорей преобразовате-

лей, где обмотка выполнена по типу обмоток машин постоянного тока, и др.

Конструктивно обмотки могут быть выполнены в зависимости от расположения их в пазах однослойными и двухслойными, в зависимости от их изготовления — ручными и шаблонными, в зависимости от числа пазов на полюс и фазу  $q$  — с целым и с дробным числом.

Части витков, расположенные в пазах, называют *активными сторонами*, так как в них индуктируются э. д. с.; части витков, соединяющие активные стороны и расположенные на торцовых частях статора или ротора, называют *лобовыми соединениями*.

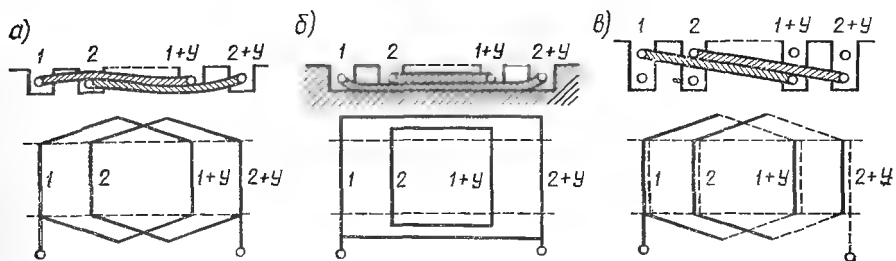


Рис. 18.1. Обмотки с полным шагом

В машинах переменного тока преимущественно применяют двухслойные обмотки, в машинах малой мощности — однослойные обмотки, изготовление которых затруднительно. При однослойном расположении активных сторон в пазах лобовые соединения лежат в одной плоскости, что делает невозможным выполнение шаблонной обмотки. На рис. 18.1, а показаны две катушки одной фазы однослойной обмотки. Катушки выполнены из проводников, отстоящих друг от друга на шаг обмотки  $y$ , равный полюсному делению  $\tau$ , т. е. расстоянию между центрами разноименных полюсов. Такую обмотку называют с *полным* или *диаметральным шагом*. Из рисунка видно, что при укладке обмотки лобовые соединения между проводами 1 и  $1+y$ , 2 и  $2+y$  и т. д. оказались лежащими в одной плоскости, и, следовательно, при намотке эти лобовые соединения необходимо выгибать в различных направлениях вручную. На рис. 18.1, б показано, как можно сделать однослойную обмотку, в которой лобовые соединения будут лежать в различных плоскостях, если изменить порядок соединения активных сторон. Однако при такой обмотке катушки имеют различную величину и, следовательно, требуется несколько шаблонов.

В двухслойных обмотках активная сторона, лежащая в верхнем слое паза, соединяется со стороной, лежащей в нижнем слое паза, отстоящего от начального на расстоянии  $y$ . В этом случае лобовые соединения не пересекаются, что дает возможность выполнения шаблонной обмотки при одинаковых размерах и форме катушек (рис. 18.1, в).

Обмотки могут быть однофазными и многофазными. На практике наиболее широко применяют трехфазные обмотки. На рис. 18.2 показаны простейшая трехфазная обмотка (а) и ее развернутая схема (б). Обмотка состоит из трех катушек с одинаковым числом

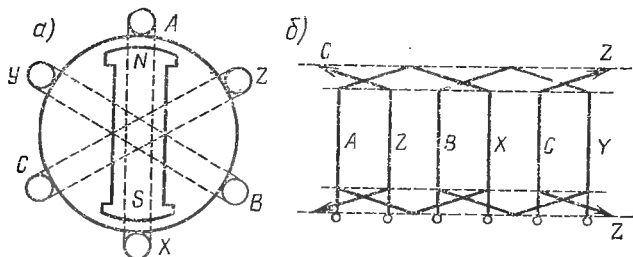


Рис. 18.2. Трехфазная обмотка (а) и ее развернутая схема (б)

витков, оси которых сдвинуты на  $120^\circ$  в пространстве. При вращении ротора с полюсами  $N$  и  $S$  в катушках фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  будут индуцированы равные по величине э. д. с., сдвинутые по фазе на одну треть периода (рис. 18.3, а).

Мощность такой трехфазной машины  $P_3 = 3EI$ , где  $E$  — действующее значение э. д. с. одной фазы;  $I$  — действующее значение тока фазы (предполагается симметричная нагрузка).

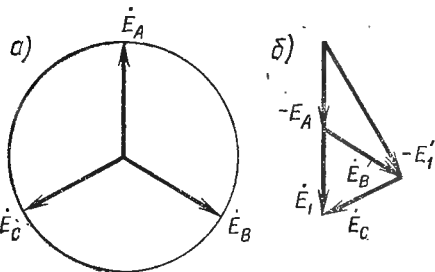


Рис. 18.3. Векторные диаграммы э. д. с. обмоток:

а — трехфазной; б — однофазной

Такую трехфазную машину можно было бы выполнить однофазной, соединив последовательно три катушки. Согласно включение трех катушек не имеет смысла, так как суммарная э. д. с. в этом случае будет равна нулю. Поэтому одну из катушек, например  $A-X$ , включим навстречу двум другим. Таким образом, начало обмотки в проводнике  $X$ , проводник  $A$  соединен с

проводником  $B$ , проводник  $Y$  — с проводником  $C$  и  $Z$  — конец обмотки. В этом случае векторная диаграмма примет вид, показанный на рис. 18.3, б.

Э. д. с. такой однофазной обмотки  $E_1 = 2E$ , а мощность машины  $P_1 = E_1 I = 2EI$ .

Ясно, что ток для однофазной и трехфазной машины одинаков. Таким образом при одном и том же расходе материалов (стали и меди), при одинаковых габаритах и потерях энергии мощность трехфазной машины окажется в 1,5 раза больше мощности однофазной машины. Машины малой мощности выполняют однофаз-

ными. Однако в них заполняется только  $2/3$  окружности статора обмоткой, а  $1/3$  остается свободной.

Если в простейшем случае имеется только две катушки  $A$  и  $B$ , а катушки  $C$  нет вообще, то э. д. с. такой однофазной машины  $E_1' = \sqrt{3}E$ , а мощность  $P_1' = \sqrt{3}EI$ . Следовательно, при двух катушках несколько уменьшается мощность однофазной машины  $P_1' = 0,5\sqrt{3}P_1$ , но получается значительный выигрыш в расходе обмоточного провода.

## § 18.2. Однослойные обмотки с полным шагом и их э. д. с.

Переменная э. д. с., индуцируемая в обмотке машины переменного тока, характеризуется величиной, частотой и формой кривой. Практикой установлено, что энергосистемы лучше всего работают при синусоидальной форме кривой э. д. с., так как при кривой, отличающейся от синусоиды, в ней содержатся высшие гармонические, которые оказывают вредное влияние не только на генератор, но и на линии передачи и на большую часть потребителей электроэнергии. В генераторах и двигателях высшие гармонические составляющие вызывают увеличение потерь и нагревание машин, в линиях электропередачи они могут способствовать возникновению перенапряжений, а также оказывают влияние на близлежащие линии связи.

Кривая э. д. с. характеризуется коэффициентом формы кривой

$$k_{\phi} = E/E_{\text{ср}}, \quad (18.1)$$

где

$$E = \sqrt{\frac{1}{0,5T} \int_0^{T/2} e^2 dt}, \quad E_{\text{ср}} = \frac{1}{0,5T} \int_0^{T/2} e dt \quad (18.2)$$

действующее и среднее значения э. д. с. соответственно;  $T$  — период изменения э. д. с.

При синусоидальной форме кривой э. д. с.  $e = E_{\text{max}} \sin \omega t$ , действующее и среднее значения э. д. с. будут:  $E = E_{\text{max}}/\sqrt{2}$ ;  $E_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} E_{\text{max}}$ , так что коэффициент формы кривой

$$k_{\phi} = E/E_{\text{ср}} = \pi/(2\sqrt{2}) = 1,11.$$

При несинусоидальной форме кривой э. д. с., которая может быть представлена гармоническим рядом, действующее значение э. д. с.  $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots}$ , где  $E_1, E_2, E_3$  и т. д. — действующие значения э. д. с. первой, второй, третьей и других гармонических составляющих. Поэтому коэффициент формы кривой при несинусоидальной э. д. с. может оказаться значительно большими, чем при синусоидальной.

Если ротор с размещенными на нем полюсами (см. рис. 18.2, а) вращать с частотой  $n$ , то в каждом проводнике обмотки статора будет индуцирована э. д. с. определенной величины частоты и формы кривой. При одном обороте ротора в пространстве, т. е. при повороте ротора на двойное полюсное деление  $2\tau$ , э. д. с. в проводнике претерпевает один период изменения. Если в общем случае машина имеет  $p$  пар полюсов, то частота э. д. с.

$$f = pn/60. \quad (18.3)$$

Мгновенное значение э. д. с. проводника  $e = lvB$ , где  $l$  — длина проводника;  $v$  — скорость перемещения магнитного поля;  $B$  — магнитная индукция. Так как  $l$  и  $v$  в нашем случае постоянны, то  $e = cB$ , где  $c$  — некоторая постоянная. Таким образом, характер изменения или форма кривой э. д. с. в проводнике определяется кривой распределения магнитной индукции  $B$  в зазоре по окружности статора. Поэтому для создания синусоидальной э. д. с. необходимо придать полюсным наконечникам такое очертание, при котором кривая распределения магнитной индукции по окружности статора тоже была синусоидальной.

Среднее значение э. д. с. проводника  $E_{cp} = lvB_{cp}$ , где  $B_{cp}$  — среднее значение магнитной индукции на одном полюсном делении.

Имея в виду выражение

$$v = \pi Dn/60 = 2\pi\tau n/60 = 2\pi n\tau/60 = 2f\tau,$$

где  $D$  — диаметр расточки статора;  $\pi D = 2\pi\tau$  — длина окружности расточки статора. Определим среднее значение э. д. с. витка:

$$E_{cp} = 2f\tau l B_{cp} = 2f\Phi, \quad (18.4)$$

где  $\tau l B_{cp} = \Phi$  — магнитный поток полюса.

Действующее значение э. д. с. проводника  $E = k_\Phi E_{cp}$ . При синусоидальной форме кривой э. д. с.  $k_\Phi = 1,11$  и тогда

$$E = k_\Phi E_{cp} = 1,11 E_{cp} = 2,22 f\Phi. \quad (18.5)$$

Если на статоре поместить виток с полным или диаметральный шагом, то один активный проводник занимает по отношению к северному полюсу точно такое же положение, что и другой активный проводник по отношению к южному полюсу. Поэтому в обоих проводниках индуцируются одинаковые по величине и форме э. д. с., складывающиеся по контуру витка алгебраически, т. е. э. д. с. витка с полным шагом имеет ту же форму кривой, что и э. д. с. проводника и, равна ее удвоенному значению. При синусоидальной форме кривой действующее значение э. д. с. витка

$$E = 2k_\Phi E_{cp} = 2 \cdot 1,11 \cdot 2f\Phi = 4,44 f\Phi. \quad (18.6)$$

Если на статоре поместить катушку с полным шагом, имеющую число витков  $w_k$ , то при синусоидальной форме кривой действующее значение э. д. с. катушки

$$E = 4,44 w_k f\Phi. \quad (18.7)$$

*Сосредоточенной однофазной обмоткой* называют такую, у которой  $q=1$ , где  $q$  — число пазов на полюс и фазу. В этом случае пазы располагают равномерно по окружности статора на расстоянии шага  $y$ , равного полюсному делению  $\tau$  ( $y=\tau$ ). Развернутая схема обмотки четырехполюсной машины показана на рис. 18.4. Обмотка состоит из двух катушек, расположенных под различными парами полюсов и соединенными последовательно, для чего конец первой катушки соединен с началом второй, а начало первой и конец второй катушек образуют начало и конец фазной обмотки  $A$  и  $X$ . Катушки могут быть также соединены параллельно.

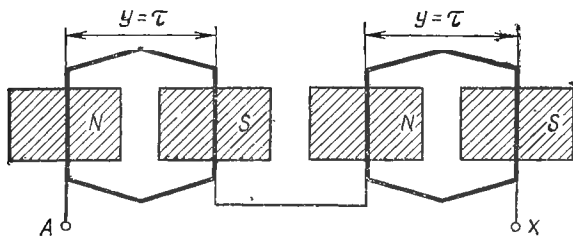


Рис. 18.4. Развернутая схема однофазной однослойной сосредоточенной обмотки

Так как в сосредоточенной обмотке с полным шагом все активные стороны находятся в одинаковых условиях по отношению к полюсам, то э. д. с. всех этих сторон и всех витков одинаковы. Если  $w$  — число последовательно соединенных витков обмотки (всех катушек), то при синусоидальной форме кривой действующее значение э. д. с.

$$E = 4,44 w f \Phi. \quad (18.8)$$

Сосредоточенная обмотка не имеет практического применения в силу ряда недостатков: плохое использование окружности статора, большой объем пазов, так как в них необходимо поместить большое число активных проводников, и невозможность изменения формы кривой э. д. с. Поэтому обмотки делают только *распределенными*, т. е. такими, у которых число пазов на полюс и фазу  $q=2, 3, \dots, k$ . В этом случае активные стороны катушек одной фазы помещают не в одном пазу под полюсом, а в нескольких.

Распределенная обмотка дает возможность уменьшить содержание высших гармонических в пространственном распределении магнитной индукции и, следовательно, в кривой э. д. с. за счет некоторого уменьшения э. д. с. При распределенной обмотке (рис. 18.5, а) оси последовательно соединенных катушек не совпадают. Следовательно, э. д. с. катушки  $A_1X_1$  опережает э. д. с. катушки  $A_2X_2$  на угол (между осями этих катушек)  $\alpha = 2\pi p/Q$ , измеряемый в электрических градусах ( $Q$  — число пазов на окружности статора), а э. д. с. катушки  $A_2X_2$  опережает э. д. с. катушки  $A_3X_3$  на этот же угол  $\alpha$ .



Уменьшение э. д. с. обмотки за счет ее распределения определяется коэффициентом распределения обмотки  $k_p$ , представляющим собой отношение геометрической суммы э. д. с. катушек к арифметической сумме этих э. д. с.:

$$k_p = |\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dots| / (E_1 + E_2 + \dots) = |\dot{E}| / (qE_{\text{кат}}), \quad (18.9)$$

где  $E_{\text{кат}}$  — э. д. с. одной катушки.

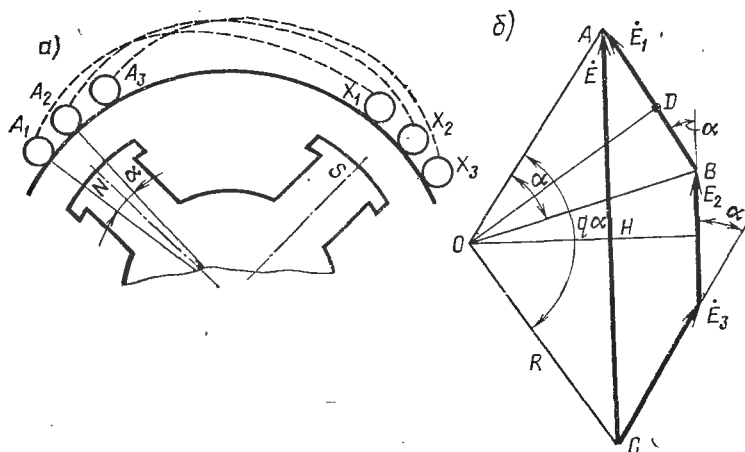


Рис. 18.5. Распределенная обмотка (а) и векторы э. д. с. катушек (б)

На диаграмме (рис. 18.5, б) показаны векторы э. д. с. трех катушек, сдвинутые по фазе на угол  $\alpha$ , геометрическая сумма которых равна  $\dot{E}$ . Из этой диаграммы определяем

$$E = 2R \sin(q\alpha/2) \text{ и } E_{\text{кат}} = 2R \sin(\alpha/2),$$

где  $R$  — радиус окружности, являющейся геометрическим местом точек концов векторов э. д. с. катушек.

Из треугольника  $OAD$  найдем  $AD = E_{\text{кат}}/2 = R \sin(\alpha/2)$ , а из треугольника  $OAH$  —  $AH = E/2 = R \sin(q\alpha/2)$ . Таким образом, коэффициент распределения обмотки

$$k_p = \sin \frac{q\alpha}{2} / \left( q \sin \frac{\alpha}{2} \right). \quad (18.10)$$

Для более высоких гармонических составляющих угол между соседними пазами определяется порядком гармонической, т. е. для пятой гармонической он составляет  $5\alpha$ , а для  $\nu$ -й гармонической —  $\nu\alpha$ . На такой же угол сдвинуты векторы э. д. с. катушек соответствующих гармоник. По аналогии с рассуждениями, приведенными для первой гармоники, получим для  $\nu$ -й гармонической следующий коэффициент распределения:

$$k_{p\nu} = \sin \frac{q\nu\alpha}{2} / \left( q \sin \frac{\nu\alpha}{2} \right). \quad (18.11)$$

Таким образом, коэффициенты распределения обмотки для высших гармонических обычно много меньше единицы, что приводит к уменьшению содержания высших гармоник в кривой э. д. с.

Трехфазная обмотка представляет собой совокупность трех фазовых обмоток, оси которых смещены на одну треть двойного полюсного деления  $2\pi/3$  или на  $120^\circ$  электрических. На рис. 18.6 показана

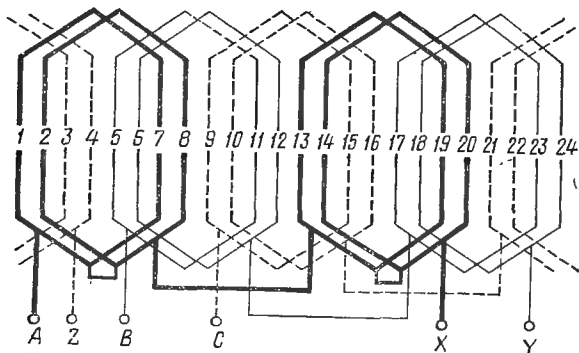


Рис. 18.6. Развернутая схема трехфазной однослойной обмотки с полным шагом

развернутая схема однослойной трехфазной обмотки с полным шагом при следующих данных: число пазов на статоре  $Q=24$ , число фаз  $m=3$ , число полюсов  $2p=4$ , число пазов на полюс и фазу  $q=Q/(2pm)=2$ .

### § 18.3. Двухслойные обмотки с укороченным шагом и их э. д. с.

На практике обмотки переменного тока выполняют двухслойными с укороченным шагом, так как укорочение шага — весьма эффективное средство уменьшения высших гармонических составляющих в кривой э. д. с.

Предположим, что в кривой распределения магнитной индукции в пространстве помимо основной существует пятая гармоническая составляющая и что витки обмотки имеют полный шаг  $y=\tau$  (рис. 18.7). В этом случае при обходе витка первая и пятая гармонические составляющие э. д. с. в одной стороне витка направлены согласно с соответствующими э. д. с., индуцируемыми в другой стороне витка. Таким образом, в кривой э. д. с. помимо основной присутствует пятая и все высшие гармонические составляющие. Если укоротить шаг обмотки на  $\tau/5$ , т. е. сделать шаг  $y=4\tau/5$  (на рисунке показано прерывистой линией), то для пятой гармонической составляющей магнитной индукции стороны витка окажутся в одинаковых условиях, т. е. под полюсами одинаковой полярности. Поэтому в сторонах витка индуцируются одинаковые по ве-

личине и направлении э. д. с. пятой гармоники. Так как при обходе витка эти э. д. с. окажутся направленными встречно и взаимно уничтожаются, то в кривой э. д. с. витка пятая гармоническая составляющая будет отсутствовать. Таким образом, укорочение шага обмотки на  $\tau/5$  ( $y=4\tau/5$ ) дает возможность исключить пятую гармонику из кривой э. д. с. При укорочении на  $\tau/3$  ( $y=2\tau/3$ ) исчезнет третья гармоника, при укорочении  $\tau/7$  ( $y=6\tau/7$ ) исчезнет седьмая гармоника из кривой э. д. с. и т. д.

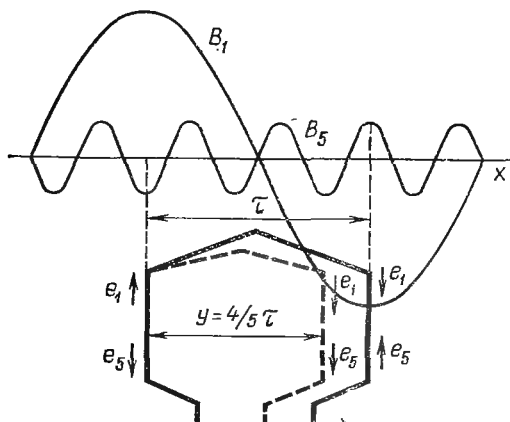


Рис. 18.7. Уничтожение пятой гармоники в кривой э. д. с.

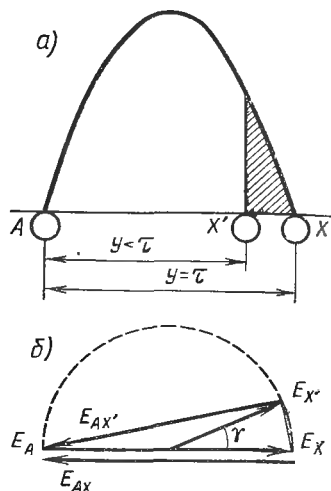


Рис. 18.8. Укорочение шага обмотки (а) и векторы э. д. с. при диаметральном и укороченном шагах обмотки (б)

Так как в линейной э. д. с. трехфазной системы третьих и всех кратных трем гармоник нет, то обычно третью гармонику не подавляют и укорочение шага делают на  $\tau/6$  ( $y=5\tau/6$ ) с тем, чтобы уменьшить амплитуды пятой и седьмой гармоник, наиболее резко выраженных в кривой э. д. с. машины.

Для снижения высших гармоник в кривой э. д. с. можно выполнить обмотки с шагом, большим полюсного деления ( $y > \tau$ ). Однако на практике этого не делают, так как выполнение такой обмотки требует увеличения расхода меди.

Укорочение шага обмотки помимо уменьшения содержания высших гармонических составляющих в кривой э. д. с. сокращает расход меди за счет уменьшения длины лобовых соединений, но вместе с этим уменьшается и э. д. с. машины. При диаметральном шаге ( $y = \tau$ ) катушка  $A-X$  пронизывается всем магнитным потоком полюса (рис. 18.8, а), а при укороченном шаге ( $y < \tau$ ) катушки  $A-X'$  этот магнитный поток уменьшится на величину, соответствующую заштрихованной площади. При диаметральном шаге э. д. с., индуцируемые в активных сторонах  $A$  и  $X$  катушки, сдвинуты по фазе

на  $180^\circ$  (рис. 18.8, б), так что э. д. с. катушки  $E_{AX}$ , представляющая собой геометрическую разность э. д. с. ее активных сторон, будет равна арифметической сумме этих э. д. с.:

$$|\dot{E}_{AX}| = |\dot{E}_A - \dot{E}_X| = E_A + E_X.$$

При укороченном шаге э. д. с. активных сторон  $A$  и  $X'$  сдвинуты на угол, меньший  $180^\circ$  по фазе, и э. д. с. катушки  $E_{AX'}$  будет меньше арифметической суммы э. д. с. этих сторон.

Уменьшение э. д. с. катушек за счет укорочения шага обмотки определяется коэффициентом укорочения  $k_y$ , представляющим собой отношение э. д. с. катушки с укороченным шагом к э. д. с. катушки с полным или диаметральной шагом:  $k_y = E_{AX'}/E_{AX} = \cos(\gamma/2)$ , где угол  $\gamma$  определяет степень укорочения шага обмотки, т. е.  $(\pi - \gamma)/\pi = y/\tau$  или  $\gamma = \pi(\tau - y)/\tau$ . Следовательно,

$$k_y = \cos \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\tau - y}{\tau} = \sin \frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}. \quad (18.12)$$

Это выражение определяет коэффициент укорочения для первой гармоники поля.

Если обмотка имеет укорочение шага на угол  $\gamma$  (эл. град.) основной гармоники поля, то для  $\nu$ -й гармоники этот угол будет равен  $\nu\gamma$  электрических градусов. Следовательно, коэффициент укорочения шага для  $\nu$ -й гармоники поля

$$k_{y\nu} = \cos \nu \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\tau - y}{\tau} = \sin \nu \frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}. \quad (18.13)$$

Если укорочение шага выполнено на  $\tau/5$ , т. е.  $y = \frac{4}{5}\tau$ , то для пятой гармоники поля коэффициент укорочения будет равен нулю:

$k_{y5} = \cos 5 \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\tau - \frac{4}{5}\tau}{\tau} = 0$  и пятой гармоники в кривой э. д. с. не будет. Также при укорочении на  $\tau/7$  будет исключена седьмая гармоника из кривой э. д. с. и т. д.

Произведение коэффициентов распределения и укорочения представляет собой обмоточный коэффициент  $k_{об} = k_p k_y$ , учитывающий уменьшение э. д. с. фазы машины переменного тока за счет распределения и укорочения шага обмотки.

Таким образом, действующее значение э. д. с. фазы машины переменного тока

$$E = 4,44 k_{об} \omega f \Phi, \quad (18.14)$$

где  $\omega$  — общее число последовательно соединенных витков одной фазы.

Все катушки, из которых состоит двухслойная обмотка, имеют одинаковые размеры, причем одна сторона катушки лежит в одном, например верхнем, слое обмотки, другая в нижнем.

На рис. 18.9 показана развернутая схема двухслойной трехфазной обмотки с укороченным шагом ( $Q=24$ ,  $q=2$ ,  $2p=4$ ,  $m=3$ ,  $y=5\tau/6$ ). На схеме двухслойной обмотки стороны, лежащие в верхнем слое пазы, показаны сплошной линией, в нижнем слое пазы — пунктиром. Для того чтобы э. д. с. фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  имели сдвиг на  $1/3$  периода, надо катушки этих фаз сместить на  $120$  эл. град. в пространстве. Следовательно, начала  $A$ ,  $B$  и  $C$  фазных обмоток и соответственно их концы  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  сдвинуть на  $120$  эл. град., т. е. на  $y_\phi = 120/\alpha$  пазов, где  $\alpha = p \cdot 360/Q = 2 \cdot 360/24 = 30^\circ$  — угол между рядом лежащими пазами, эл. град. Таким образом,  $y_\phi = 120Q/(p \cdot 360) = Q/(3p)$ .

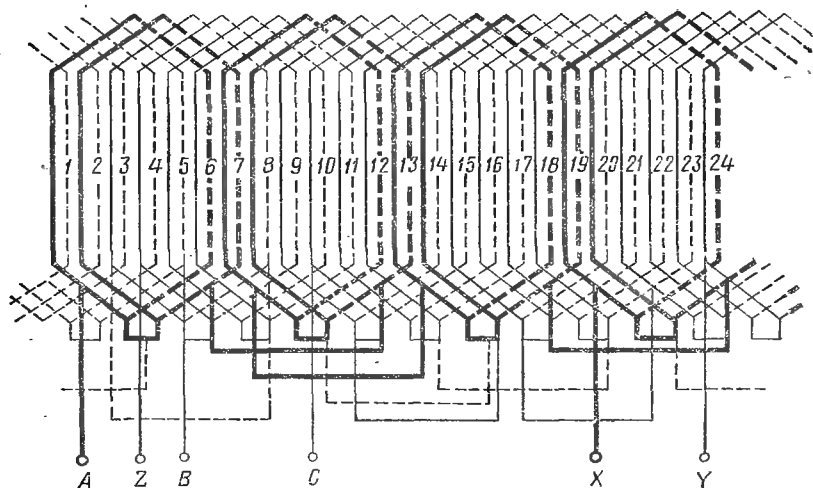


Рис. 18.9. Развернутая схема трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом

В нашей схеме  $Q=24$ ,  $p=2$ , следовательно,  $y_\phi = 24/(3 \cdot 2) = 4$ .

Начало фазы  $A$  выбрано в первом пазу, начало фазы  $B$  — в пазу  $1 + y_\phi = 5$ , начало фазы  $C$  — в пазу  $5 + y_\phi = 9$ .

Полюсное деление  $\tau = Q/(2p) = 24/4 = 6$ , шаг обмотки  $y = 5\tau/6 = 5$ . Так как начало фазы  $A$  выбрано в верхнем слое первого пазы, то первая катушка этой фазы состоит из активных проводов верхнего слоя пазы 1 и нижнего слоя пазы  $1 + y = 6$ , вторая катушка — из проводов верхнего слоя пазы 2 и нижнего слоя пазы  $2 + y = 7$ . Верхние активные стороны пазов 3, 4, 5, 6 заняты проводниками катушек фаз  $B$  и  $C$ . Последующие катушки фазы  $A$  располагаются в верхнем слое пазов 7 и 8 и в нижнем слое пазов  $7 + y = 12$  и  $8 + y = 13$ ; в верхнем слое пазов 13, 14, 19, 20 и в нижнем слое пазов  $13 + y = 18$ ,  $14 + y = 19$ ;  $19 + y = 24$ ;  $20 + y = 25$  (1 паз). Так как катушки пазов 1—6, 2—7 и пазов 7—12, 8—13 отстоят на расстоянии полюсного деления, то э. д. с. этих катушек находятся в противофазе. Поэтому вторая пара катушек (7—12, 8—13) соединяется встречно с первой (1—6, 2—7), т. е. конец второй катушки соединяется с концом четвертой. Аналогично выполнено соединение двух других пар катушек. Соединение катушек, составляющих фазы  $B$  и  $C$ , выполнено подобно соединению катушек фазы  $A$ .

Для рассмотренной обмотки коэффициент распределения для основной гармонической составляющей

$$k_{p1} = \sin \frac{q\alpha}{2} / \left( q \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \sin \frac{2 \cdot 30}{2} / \left( 2 \sin \frac{30}{2} \right) = 0,966;$$

коэффициент укорочения  $k_{y1} = \cos \frac{y}{2} = \cos \frac{\tau - y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2} = 0,966$ ; обмоточный коэффициент  $k_{об1} = k_{p1} k_{y1} = 0,93$ .

§ 19.1. Распределение намагничивающей силы  
в пространстве

Ток, протекая по проводникам обмотки машины переменного тока, возбуждает магнитное поле, распределение которого в пространстве зависит от конструкции обмотки. При сосредоточенной обмотке ( $q=1$ ) фаза состоит из одной катушки на пару полюсов, и распределение н. с.  $F$  такой катушки в пространстве имеет прямоугольную форму (рис. 19.1, а), если положить, что ток сосредоточен в средней точке паза. В любой точке между начальной  $A$  и конечной  $X$  активными сторонами существует магнитная линия, имеющая одинаковое направление и охватывающая одно и то же число проводов с током, т. е. в любой точке между сторонами  $A$  и  $X$  н. с. имеет одно и то же значение  $i\omega$ , где  $i$  — ток, протекающий по проводам катушки в выбранный момент времени;  $\omega$  — число витков катушки. В любой определенной точке слева от провода  $A$  и справа от провода  $X$  н. с. имеет то же самое значение, но направление силовых линий магнитного поля противоположно направлению их в промежутке между точками  $A$  и  $X$ , следовательно, н. с. имеет обратный знак.

При этом в пространственном распределении н. с. велико содержание высших гармонических составляющих, что поведет к созданию высших гармоник в кривой э. д. с. Для снижения высших гармоник в кривой н. с., а следовательно, и в кривой э. д. с. обмотку выполняют распределенной. Если  $q=2$ , т. е. витки одной фазы, приходящиеся на одну пару полюсов, распределены между двумя катушками, то распределение н. с. в пространстве будет иметь ступенчатую зависимость (рис. 19.1, б). Катушка  $A_1X_1$  с током создает н. с.  $F_1$ , катушка  $A_2X_2$  — н. с.  $F_2$ . Распределение в пространстве этих н. с. имеет вид прямоугольной зависимости, а результирующую н. с.  $F$  двух катушек находят в виде суммы  $F_1$  и  $F_2$  в любой точке окружности статора.

При увеличении числа  $q$  увеличивается число ступеней пространственного распределения н. с. и кривая н. с. приближается к синусоиду. На рис. 19.1, в показано распределение н. с. в пространстве при  $q=4$ .

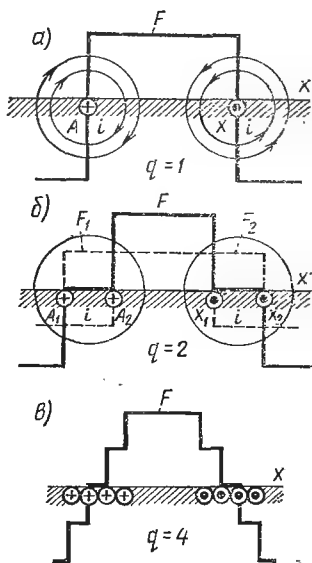


Рис. 19.1. Распределение н. с. в пространстве:

а —  $q=1$ ; б —  $q=2$ ; в —  $q=4$

Если выполнить обмотку с  $q=\infty$ , т. е. проводники непрерывно и равномерно поместить на окружности статора, то распределение н. с. в пространстве будет трапецеидальным (рис. 19.2, а). В действительности проводники сосредоточены в пазах и распределение н. с. в пространстве имеет вид ступенчатой зависимости (рис. 19.2, б). Придавая трапецеидальной кривой тот или иной вид, можно исключить из пространственного распределения н. с. третью, пятую и т. д. гармонические составляющие.

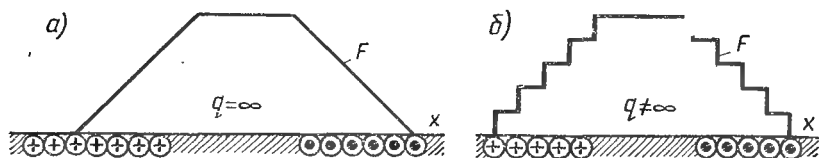


Рис. 19.2. Распределение н. с. в пространстве для обмотки:  
а —  $q=\infty$ ; б — реальной

## § 19.2. Намагничивающая сила однофазной обмотки

При распределенной обмотке кривая н. с. имеет ступенчатую зависимость, причем с повышением  $q$  число ступеней увеличивается и в пространственном распределении н. с. содержание высших гармонических составляющих уменьшается. Ограничиваясь рассмотрением основной гармоники распределения н. с. в пространстве и выбрав начало пространственной координаты на оси однофазной обмотки, можно записать  $F_x = F_{\max x} \cos(x\pi/\tau)$ , где  $F_{\max x}$  — амплитуда пространственного распределения н. с., изменяющаяся во времени. Если ток, протекающий по обмотке, синусоидален, т. е.  $i = I_{\max} \sin \omega t$ , то  $F_{\max x} = F_{\max} \sin \omega t$ .

Однофазная обмотка при прохождении по ней переменного тока создает пульсирующее магнитное поле, неподвижное в пространстве и изменяющееся во времени с частотой тока сети.

Вектор н. с., направленный по какой-либо прямой (например, по оси  $y$ ) и синусоидально изменяющийся во времени, может быть представлен геометрической суммой двух векторов, равных и неизменных по величине, вращающихся с одинаковой частотой в различных направлениях (рис. 19.3), при условии  $F_1 = F_2 = 0,5 F_{\max}$  и при вращении векторов  $F_1$  и  $F_2$  с одинаковой частотой в различных направлениях ( $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ ).

Для любого момента времени можно записать равенство

$$F_{\max} \sin \omega t = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1 F_2 \cos 2\alpha} = F_{\max} \sqrt{(1 - \cos 2\alpha)/2},$$

откуда  $\sin \omega t = \sin \alpha$ , т. е.  $\alpha = \omega t$ . Углы  $\alpha$  между направлением векторов  $F_1$  и  $F_2$  и осью абсцисс линейно изменяются во времени, т. е. векторы  $F_1$  и  $F_2$  поворачиваются с равномерной частотой.

н. с. пульсирующего поля однофазной обмотки машины переменного тока

$$F_{tx} = F_{\max} \sin \omega t \cos(x\pi/\tau), \text{ или}$$

$$F_{tx} = 0,5F_{\max} \sin(\omega t - x\pi/\tau) + 0,5F_{\max} \sin(\omega t + x\pi/\tau). \quad (19.1)$$

Каждое из полученных слагаемых представляет собой синусоидальную волну н. с., перемещающуюся вдоль окружности статора. Скорости перемещения этих волн найдем из выражений:  $\omega t - x\pi/\tau = 0$  и  $\omega t + x\pi/\tau = 0$ , откуда

$$v_{\text{пр}} = x/t = \omega\tau/\pi = 2f\tau; \quad v_{\text{об}} = x/t = -\omega\tau/\pi = -2f\tau.$$

Имея в виду следующие выражения:  $v = \pi D n_1 / 60$  и  $\tau = \pi D / (2p)$ , где  $D$  — диаметр статора;  $n_1$  — частота вращения магнитного поля, получим  $2p\tau n_1 / 60 = \pm 2f$ .

Отсюда частота вращения прямого и обратного магнитного поля

$$n_1 = \pm 60f/p, \quad (19.2)$$

где  $f$  — частота тока;  $p$  — число пар полюсов.

Таким образом, н. с. пульсирующего магнитного поля однофазной обмотки может быть представлена в виде двух вращающихся с одинаковыми частотами в противоположных направлениях н. с. (прямой и обратной), амплитуды которых равны между собой и вдвое меньше амплитуды н. с. пульсирующего поля, а частота вращения их зависит от частоты тока и числа пар полюсов машины.

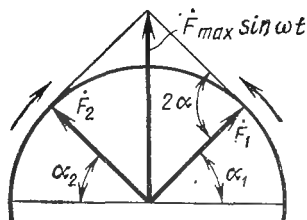


Рис. 19.3. Представление пульсирующего магнитного поля двумя вращающимися в различных направлениях

### § 19.3. Намагничивающая сила двухфазной и трехфазной обмоток

В некоторых случаях применяют двухфазную обмотку. Например, для пуска однофазных асинхронных двигателей, в конденсаторных двигателях и др. Так, простейшую двухфазную обмотку представим в виде двух катушек (рис. 19.4), оси которых смещены в пространстве на  $90^\circ$  (электрических). Если по этим катушкам, имеющим одинаковое число витков, пропустить равные по величине и сдвинутые по фазе на четверть периода синусоидальные токи:  $i_A = I_{\max} \sin \omega t$ ;  $i_B = I_{\max} \sin(\omega t + \pi/2) = I_{\max} \cos \omega t$ , то н. с. этих катушек будут также синусоидальны и сдвинуты по фазе на четверть периода, т. е.  $F_A = F_{\max} \sin \omega t$  и  $F_B = F_{\max} \cos \omega t$ .

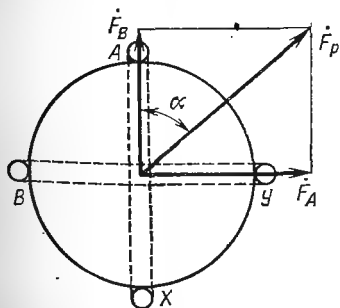


Рис. 19.4. Простейшая двухфазная обмотка



При этом вектор н. с.  $F_A$  направлен по оси катушки  $A-X$ , а вектор н. с.  $F_B$  — по оси катушки  $B-Y$ .

В любой момент времени результирующую н. с. найдем как геометрическую сумму н. с. катушек  $A$  и  $B$ :  $\vec{F}_p = \vec{F}_A + \vec{F}_B$ , т. е. численное значение результирующей н. с.

$$F_{\text{рез}} = \sqrt{F_{\text{max}}^2 \sin^2 \omega t + F_{\text{max}}^2 \cos^2 \omega t} = F_{\text{max}}.$$

Следовательно, в любой момент времени результирующая н. с. двухфазной обмотки имеет неизменное значение, равное амплитуде н. с. одной фазы. Из выражения  $\tan \alpha = F_A / F_B = \tan \omega t$  следует, что  $\alpha = \omega t$ , т. е. угол между вектором результирующей н. с. и осью ординат линейно изменяется во времени и, следовательно, этот вектор вращается с постоянной частотой.

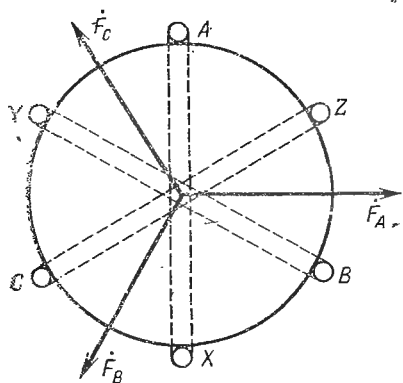


Рис. 19.5. Простейшая трехфазная обмотка

Ограничиваясь основной гармоникой, н. с. фазы  $A$  определяют следующим выражением:  $F_A = F_{\text{max}} \sin \omega t \cos(x\pi/\tau)$ .

Н. с. фазы  $B$  сдвинута по фазе на  $\pi/2$  относительно н. с. фазы  $A$  и катушка  $B-Y$  повернута относительно катушки  $A-X$  на  $\pi/2$  в пространстве. Следовательно, выражение н. с. фазы  $B$  принимает следующий вид:

$$F_B = F_{\text{max}} \sin(\omega t + \pi/2) \cos(x\pi/\tau + \pi/2).$$

Пульсирующую н. с. одной фазы можно представить в виде двух вращающихся в различных направлениях н. с., т. е.

$$F_A = 0,5 F_{\text{max}} [\sin(\omega t + x\pi/\tau) + \sin(\omega t - x\pi/\tau)];$$

$$F_B = 0,5 F_{\text{max}} [\sin(\omega t + x\pi/\tau + \pi) + \sin(\omega t - x\pi/\tau)].$$

Откуда результирующая н. с.

$$F_{\text{рез}} = 0,5 F_{\text{max}} [\sin(\omega t + x\pi/\tau) + \sin(\omega t - x\pi/\tau) + \sin(\omega t + x\pi/\tau + \pi) + \sin(\omega t - x\pi/\tau)].$$

Так как  $\sin(\omega t + x\pi/\tau) + \sin(\omega t + x\pi/\tau + \pi) = 0$ , то результирующая н. с.  $F_{\text{рез}} = F_{\text{max}} \sin(\omega t - x\pi/\tau)$ , т. е. двухфазная обмотка создает вращающееся магнитное поле, н. с. которого равна амплитуде н. с. одной фазы и частота вращения  $n_1 = 60/f$  пр.

Для изменения направления вращения этого поля необходимо изменить направление н. с. одной из катушек, т. е. надь изменить направление тока в одной из катушек, поменяв местами проводники, подключающие эту катушку к сети, или проводники, подключающие катушки  $A-X$  и  $B-Y$  к сети.

Простейшая трехфазная обмотка представлена тремя катушками (рис. 19.5), оси которых сдвинуты на 120 эл. град. в простран-

стве. Если через эти три катушки пропустить равные по величине и взаимно сдвинутые по фазе на  $2\pi/3$  токи:

$$i_A = I_{\max} \sin \omega t; \quad i_B = I_{\max} \sin (\omega t - 2\pi/3); \quad i_C = I_{\max} \sin (\omega t - 4\pi/3),$$

то и н. с. этих катушек будут сдвинуты по фазе на  $2\pi/3$ .

Ограничиваясь основной гармоникой н. с. и учитывая смещение фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  катушек на  $2\pi/3$  в пространстве, выражения н. с. трех фаз будут следующими:

$$\begin{aligned} F_A &= F_{\max} \sin \omega t \cos x\pi/\tau; \\ F_B &= F_{\max} \sin (\omega t - 2\pi/3) \cos (x\pi/\tau - 2\pi/3); \\ F_C &= F_{\max} \sin (\omega t - 4\pi/3) \cos (x\pi/\tau - 4\pi/3). \end{aligned}$$

Представляя пульсирующую н. с. каждой фазы в виде двух вращающихся в различных направлениях полей, получим:

$$\begin{aligned} F_A &= 0,5F_{\max} [\sin (\omega t + x\pi/\tau) + \sin (\omega t - x\pi/\tau)]; \\ F_B &= 0,5F_{\max} [\sin (\omega t + x\pi/\tau - 4\pi/3) + \sin (\omega t - x\pi/\tau)]; \\ F_C &= 0,5F_{\max} [\sin (\omega t + x\pi/\tau - 2\pi/3) + \sin (\omega t - x\pi/\tau)]. \end{aligned}$$

Так как вторые слагаемые одинаковы и сумма трех первых слагаемых этих выражений равна нулю:  $\sin (\omega t + x\pi/\tau) + \sin (\omega t + x\pi/\tau - 4\pi/3) + \sin (\omega t + x\pi/\tau - 2\pi/3) = 0$ , то результирующая н. с. трехфазной обмотки  $F_{\text{рез}} = \frac{3}{2} F_{\max} \sin (\omega t - \frac{x}{\tau} \pi)$ .

Следовательно, трехфазная обмотка создает вращающееся магнитное поле, н. с. которого неизменна и равна  $3/2$  амплитуды н. с. одной фазы, частота вращения магнитного поля  $n_1 = 60/p$ . Направление вращения магнитного поля зависит от чередования фаз. Если изменить чередование фаз, поменяв местами любые два из трех проводов, подключающих трехфазную обмотку к сети, то изменится направление вращения магнитного поля.

При максимальном значении тока  $\sqrt{2}I_K$  н. с. катушки на полюс  $F_{\max} = \sqrt{2}I_K w_K / 2$ , где  $w_K$  — число витков катушки.

Если представить н. с. катушки гармоническим рядом, то амплитуда первой (или основной) гармоники

$$F_1 = \frac{4}{\pi} F_{\max} = \frac{4}{\pi} \times$$

$$\times \frac{\sqrt{2}}{2} I_K w_K = 0,9 I_K w_K.$$

При распределенной обмотке оси катушек, составляющих фазу, не совпадают и н. с. определяются геометрической суммой н. с. отдельных катушек. При укорочении шага обмотки н. с. также равна геометрической сумме н. с. катушек. Следовательно, при определении н. с. фазы обмотки необходимо учесть как распределение, так и укорочение шага обмотки. Н. с. одной фазы двухслойной обмотки на один полюс  $F_1 = 2F'_{\max} k_p k_y = 0,9 I_K q 2w_K k_{\text{об}}$ , где  $F'_{\max}$  — амплитуда н. с. «катушечной группы» верхнего или нижнего слоя;  $k_p$ ,  $k_y$  и  $k_{\text{об}}$  — коэффициенты распределения, укорочения и обмоточный;  $2w_K$  — удвоенное число витков катушки двухслойной обмотки.

ТРЕХФАЗНАЯ АСИНХРОННАЯ МАШИНА  
ПРИ НЕПОДВИЖНОМ РОТОРЕ

## § 20.1. Холостой ход асинхронной машины

При разомкнутой обмотке ротора асинхронного двигателя с фазовым ротором возникает режим х. х., подобный режиму х. х. трансформатора. При этом первичной обмоткой является обмотка статора, а вторичной — обмотка ротора. Под действием приложенного к обмотке статора напряжения сети  $U_1$  протекает ток х. х.  $I_0$ , создающий вращающееся магнитное поле, большая часть магнитных линий которого сцеплена с витками обмоток статора и ротора, образуя основной магнитный поток  $\Phi$ . Часть магнитных линий будет сцеплена лишь с витками обмотки статора, образуя поток рассеяния  $\Phi_{s1}$ .

Основной магнитный поток индуцирует в обмотках статора и ротора э. д. с., фазные действующие значения которых

$$E_1 = 4,44 k_{o61} \omega_1 f \Phi; \quad E_2 = 4,44 k_{o62} \omega_2 f \Phi,$$

где  $k_{o61}$  и  $k_{o62}$  — обмоточные коэффициенты;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — числа витков обмоток статора и ротора соответственно.

Отношение

$$k_e = E_1 / E_2 = k_{o61} \omega_1 / (k_{o62} \omega_2) \quad (20.1)$$

называют коэффициентом трансформации э. д. с., который приближенно определяют опытным путем отношением фазных значений э. д. с. обмоток статора и ротора при х. х. Так как ток х. х. относительно мал, то э. д. с. обмотки статора можно считать приближенно равной напряжению:  $E_1 \approx U_1$ ;  $E_2 = U_2$ . Следовательно,  $k_e = E_1 / E_2 \approx U_1 / U_2$ . Коэффициент трансформации э. д. с. отличается от коэффициента трансформации трансформатора отношением обмоточных коэффициентов.

Из (20.1) имеем  $E_1 = k_e E_2 = E_2'$ , где  $E_2'$  — приведенное к обмотке статора действующее значение э. д. с. фазы обмотки ротора.

Поток рассеяния  $\Phi_{s1}$  индуцирует в каждой фазе обмотки статора э. д. с. рассеяния  $\dot{E}_{s1} = -j \dot{I}_0 X_1$ , где  $X_1$  — индуктивное сопротивление фазы обмотки статора. Кроме того, каждая фаза обмотки статора обладает активным сопротивлением  $r_1$ , вызывающим падение напряжения  $I_0 r_1$ .

Следовательно, для одной фазы статора уравнение равновесия э. д. с. будет

$$U_1 = -E_1 + I_0 r_1 + j I_0 X_1. \quad (20.2)$$

Соответствующая этому уравнению эквивалентная схема изображена на рис. 20.1, а, а векторная диаграмма асинхронного двигателя — на рис. 20.1, б, которые подобны эквивалентной схеме и векторной диаграмме трансформатора при х. х.

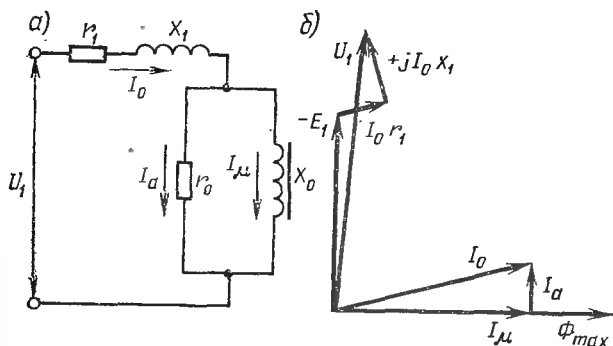


Рис. 20.1. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) асинхронной машины при х. х.

Ток х. х.  $I_0$  имеет реактивную или намагничивающую составляющую  $I_\mu$ , потребляемую для возбуждения магнитного поля, и активную составляющую  $I_a$ , необходимую для покрытия потерь в стали статора и ротора, а также в обмотке статора. Так как асинхронный двигатель имеет воздушный зазор между статором и ротором, то его ток х. х.  $I_0$  всегда значительно больше, чем у трансформатора той же мощности, где магнитный поток замыкается в основном через сталь. Поэтому если у трансформатора средней мощности ток х. х. составляет 5—10%, то у асинхронного двигателя такой же мощности он составит 20—35% номинального значения. Индуктивное  $X_1$  и активное  $r_1$  сопротивления асинхронного двигателя также относительно больше и, следовательно, падения напряжения  $I_0 r_1$  и  $I_0 X_1$ , малые при х. х. трансформатора, в асинхронных двигателях достигают нескольких процентов номинального напряжения. Но все же и здесь основной магнитный поток  $\Phi_{\max}$  и соответственно э. д. с.  $E_1$  имеют основное значение, а поэтому приближенно можно считать  $E_1 \approx U_1$ .

## § 20.2. Короткое замыкание асинхронной машины

При заторможенном роторе и короткозамкнутой его обмотке асинхронный двигатель подобен короткозамкнутому трансформатору с той лишь разницей, что ток к. з.  $I_{к.з}$  двигателя превышает номи-

нальный ток  $I_{\text{ном}}$  в  $4 \div 7$  раз, тогда как в трансформаторе  $I_{\text{к.з.}} = (12 \div 18) I_{\text{ном}}$ . Однако двигатель, так же как и трансформатор, нельзя длительно оставлять под полным напряжением при к. з. во избежание чрезмерного нагрева. Поэтому для определения параметров к. з. производят опыт к. з.: к двигателю подводят такое пониженное напряжение, при котором  $I_{\text{к.з.}} = I_{\text{ном}}$ .

Так как между асинхронным двигателем и трансформатором при к. з. существует полное подобие, то эквивалентная схема и векторная диаграмма асинхронного двигателя не имеют принципиального отличия от эквивалентной схемы и векторной диаграммы трансформатора. Однако условия приведения ротора к цепи статора асинхронной машины сложнее, чем в трансформаторе, так как ротор конструктивно может сильно отличаться от статора. Под *приведенной обмоткой* ротора подразумевают такую обмотку, которая имеет те же числа фаз и витков в фазе и то же расположение обмотки, что и обмотка статора.

При опыте к. з. асинхронного двигателя приложенное напряжение значительно меньше номинального, а токи, возникающие в обмотке ротора, создают вращающееся магнитное поле, направленное встречно магнитному полю статора. Поэтому основной магнитный поток  $\Phi$  мал и н. с.  $F_0 = m_1 k_{061} \omega I_0$  (и соответственно током  $I_0$ ), возбуждающей этот магнитный поток, можно пренебречь. Тогда из условия равновесия н. с. статора и ротора получим

$$m_1 k_{061} \omega_1 I_1 = m_2 k_{062} \omega_2 I_2,$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — числа фаз;  $I_1$  и  $I_2$  — токи в фазах статора и ротора соответственно.

Коэффициент трансформации токов

$$k_i = I_2 / I_1 = m_1 k_{061} \omega_1 / (m_2 k_{062} \omega_2). \quad (20.3)$$

Приведенный ток ротора  $I_2' = I_1 = I_2 / k_i$ .

При определении приведенного значения активного сопротивления фазы обмотки ротора будем исходить из того, что потери в обмотке ротора должны остаться неизменными:  $m_2 I_2'^2 r_2 = m_1 (I_2')^2 r_2'$ , откуда

$$\begin{aligned} r_2' &= r_2 \frac{m_2 I_2'^2}{m_1 (I_2')^2} = r_2 \frac{m_2}{m_1} \left( \frac{m_1 k_{061} \omega_1}{m_2 k_{062} \omega_2} \right)^2 = \\ &= r_2 \frac{k_{061} \omega_1}{k_{062} \omega_2} \cdot \frac{m_1 k_{061} \omega_1}{m_2 k_{062} \omega_2} = r_2 k_e k_i = r_2 k, \end{aligned} \quad (20.4)$$

где  $k = k_e k_i$  — коэффициент трансформации асинхронного двигателя.

При определении приведенного значения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора будем исходить из того, что фазный угол между э. д. с. и током в роторе должен остаться неизменным:  $\text{tg } \Psi_2 = X_2 / r_2 = X_2' / r_2'$ , откуда

$$X_2' = r_2' X_2 / r_2 = k_e k_i X_2 = k X_2. \quad (20.5)$$

По аналогии с трансформаторами параметры к. з. асинхронной машины (активное и индуктивное сопротивление) будут

$$r_k = r_1 + r'_2; \quad X_k = X_1 + X'_2, \quad (20.6)$$

где  $r_k$  и  $X_k$  — активное и индуктивное сопротивление к. з. фазы двигателя.

Мощность, потребляемая двигателем при к. з., практически расходуется на покрытие потерь в обмотках статора и ротора:

$$P_k = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1^2 r_1 + m_1 (I'_2)^2 r'_2 = m_1 I_1^2 r_k. \quad (20.7)$$

Следует иметь в виду, что в отличие от трансформаторов параметры к. з. асинхронной машины  $r_k$  и  $X_k$  не всегда постоянны.

### § 20.3. Индукционный регулятор

*Индукционный регулятор* представляет собой асинхронную машину с заторможенным ротором, регулирующим напряжение в широких пределах. В роторе регулятора помещается фазная обмотка. Напряжение регулируется поворотом ротора, приводящим к изменению сдвига фаз между э. д. с., созданными вращающимся магнитным полем в фазах обмоток статора и ротора. Для поворота и торможения ротора служит червячная передача с самоторможением (в такой передаче тангенс угла наклона винтовой линии червяка меньше коэффициента трения).

Схема трехфазного индукционного регулятора показана на рис. 20.2. Обмотки статора началами фаз подключены к трем проводам сети источника энергии с напряжением  $U_1$ . К той же сети через скользящие контакты щеток и колец подключена трехфазная обмотка ротора, соединенная звездой. Обмотки статора концами фаз соединены с сетью приемника энергии, напряжение которой  $U_2$  может изменяться в широких пределах с помощью индукционного регулятора.

Возможна схема регулятора, при которой обмотки статора соединены звездой (или треугольником), а обмотки ротора включены между сетями источника и приемника энергии. Недостаток такой схемы — наличие двух комплектов контактных колец. Для устранения скользящих контактов обмотки ротора соединяют гибкими проводниками с сетями приемника и источника энергии, а на роторе ставят ограничитель, не позволяющий повернуть ротор на  $360^\circ$ .

Действие регулятора поясняет векторная диаграмма (рис. 20.3), построенная для одной фазы регулятора. При включении регулято-

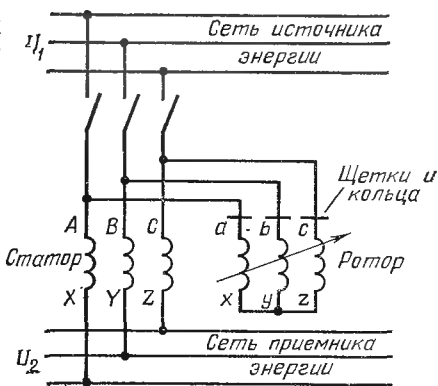


Рис. 20.2. Схема трехфазного индукционного регулятора

ра в сеть  $U_1$  трехфазная обмотка ротора создает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует э. д. с. в фазах обмоток статора ( $E_1$ ) и ротора ( $E_2$ ). Если пренебречь падением напряжения в активном и индуктивном сопротивлениях обмотки ротора, то для фазных значений приложенного напряжения  $U_1$  и э. д. с. ротора  $E_2$  можно записать, что  $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_2$  (справедливо для любого положения ротора). Таким образом, вектор э. д. с.  $\dot{E}_2$  равен и противоположен вектору  $\dot{U}_1$  при любом положении ротора в пространстве.

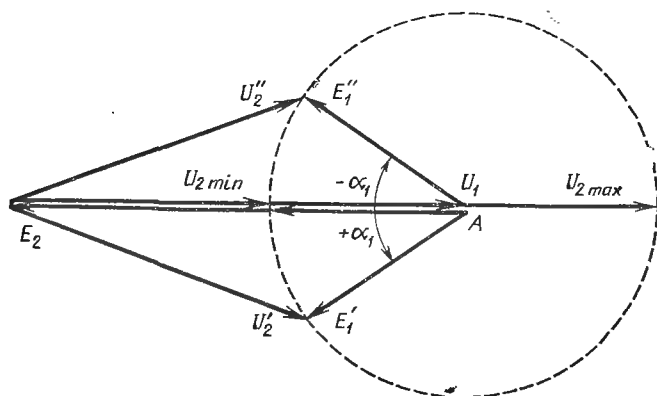


Рис. 20.3. Векторная диаграмма для одной фазы индукционного регулятора

Для удобства построения диаграммы будем считать, что э. д. с. фазы статора меньше э. д. с. фазы ротора:  $E_1 < E_2$ . Если ротор занимает такое положение, при котором оси катушек статора и ротора совпадают, то и э. д. с., индуцируемые вращающимся магнитным полем в обмотках статора и ротора, также совпадают по фазе, т. е. вектор  $\dot{E}_1$  совпадает с вектором  $\dot{E}_2$  и направлен противоположно вектору  $\dot{U}_1$ .

Если повернуть ротор на какой-либо угол по направлению вращения магнитного поля ( $+\alpha_1$ ), то силовые линии вращающегося поля пересекают витки катушек статора раньше, чем витки катушек ротора. Тогда э. д. с. статора опережает по фазе э. д. с. ротора, т. е. вектор э. д. с. статора  $\dot{E}_1'$ , неизменный по величине, окажется повернутым на угол  $+\alpha_1$  относительно неизменного вектора  $\dot{E}_2$ , равного вектору  $\dot{U}_1$  с обратным знаком. При повороте ротора против поля ( $-\alpha_1$ ) э. д. с. статора будет отставать по фазе от э. д. с. ротора и на диаграмме вектор  $\dot{E}_1''$  повернут на угол  $-\alpha_1$  в сторону отставания относительно вектора  $\dot{E}_2$ . Изменяя угол поворота ротора, мы будем менять угол между векторами фазных э. д. с. статора и ротора, и если непрерывно поворачивать ротор, то вектор э. д. с. статора будет изменять свое положение так, что конец этого вектора опишет окружность радиусом  $E_1$  из точки  $A$ , являющейся концом вектора  $\dot{U}_1$ .

Напряжение  $U_2$  зависит не только от приложенного напряжения  $U_1$ , но также и от э. д. с. статора  $E_1$ , так что оно определится как

геометрическая сумма  $U_1$  и  $E_1$ , т. е.  $\vec{U}_2 = \vec{U}_1 + \vec{E}_1$ . Численное значение напряжения  $U_2 = \sqrt{U_1^2 + E_1^2 - 2U_1E_1 \cos \alpha}$ .

При повороте ротора от 0 до  $180^\circ$  может быть получено любое напряжение на выходе в пределах от  $U_{2\min} = U_1 - E_1$  (при  $\alpha = 0$ ) до  $U_{2\max} = U_1 + E_1$  (при  $\alpha = 180^\circ$ ).

Если выполнить регулятор с коэффициентом трансформации равным единице, т. е.  $E_1 = E_2 = U_1$ , то  $U_{2\min} = 0$  и  $U_{2\max} = 2U_1$  и, следовательно, такой регулятор дает возможность регулировать напряжение на выходе в пределах от нуля до двойного напряжения сети.

Возможность равномерного изменения напряжения в широких пределах — очень ценное свойство, благодаря которому этот регулятор широко применяют. Однако регулятор обладает рядом недостатков, которые выражаются в следующем:

1) регулируемое напряжение  $U_2$  изменяется не только по величине, но и по фазе, что не позволяет включать этот регулятор параллельно с каким-либо другим регулятором;

2) на валу регулятора создаются большие вращающие моменты, вызывающие необходимость в громоздкой механической передаче с самоторможением;

3) обмотки регулятора имеют большие индуктивные сопротивления, которые приводят к значительному изменению напряжения при колебаниях нагрузки;

4) за счет наличия воздушного зазора между статором и ротором в регуляторе, так же как и в любой асинхронной машине, оказывается большим реактивный намагничивающий ток и регулятор имеет низкий  $\cos \phi$ .

Первые два недостатка — изменение фазы напряжения и механические силы на валу регулятора — в устройствах большой мощности устраняются двойными регуляторами, векторы э. д. с. статорных обмоток которых поворачиваются в противоположных направлениях при повороте ротора.

Следует иметь в виду, что регулятор используют при автотрансформаторной схеме и, следовательно, его регулируемая или выходная мощность  $P$ , отдаваемая приемникам энергии, не равна номинальной или габаритной мощности  $P_{\text{ном}}$ . Между этими мощностями так же, как в автотрансформаторе, имеет место следующее соотношение:  $P_{\text{ном}} = P[1 - U_1/(U_1 + E_1)]$  или  $P = P_{\text{ном}}(U_1 + E_1)/U_1$ .

## Глава 21

### РАБОТА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ ВРАЩАЮЩЕМСЯ РОТОРЕ

#### § 21.1. Скольжение, частота тока, ток и э. д. с. обмотки вращающегося ротора

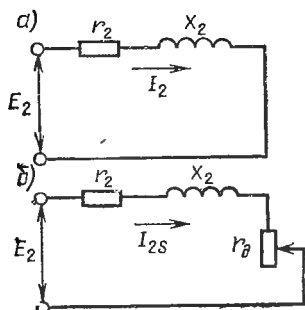
При рассмотрении принципа действия асинхронного двигателя было отмечено, что частота вращения ротора меньше частоты поля статора ( $n_2 < n_1$ ), т. е. поле статора перемещается относительно ротора с частотой  $n_s = n_1 - n_2$ .



Степень отставания ротора от вращающегося магнитного поля статора характеризуется скольжением  $S$ , представляющим собой разность между  $n_1$  и  $n_2$ , выраженную в относительных единицах или процентах, относительно частоты вращающегося магнитного поля статора:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \text{ или } S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%,$$

откуда  $n_s = Sn_1 = n_1 - n_2$ ;  $n_2 = n_1 - n_s = (1 - S)n_1 = 60f_1(1 - S)/p$ .



В современных машинах скольжение мало и при номинальной нагрузке составляет  $0,03 \div 0,05$  ( $3 \div 5\%$ ). В некоторых машинах оно может достигать значений  $0,12 \div 0,15$  ( $12 \div 15\%$ ) при номинальной нагрузке. При неподвижном роторе частота тока в роторе равна частоте тока сети  $f_1$  и каждая фаза обмотки ротора обладает активным и реактивным сопротивлениями  $r_2$  и  $X_2$ , так что ток в фазе замкнутой накоротко обмотке неподвижного ротора

Рис. 21.1. Эквивалентная схема фазы обмотки неподвижного (а) и вращающегося (б) ротора

$$I_2 = E_2 / \sqrt{r_2^2 + X_2^2}. \quad (21.1)$$

При вращении ротора частота тока в роторе  $f_2$  меньше частоты тока сети. Так как за один оборот магнитного поля относительно ротора э. д. с., индуцируемая в роторе, претерпевает  $p$  периодов изменения, где  $p$  — число пар полюсов, а магнитное поле относительно ротора вращается с частотой  $n_s$ , то частота э. д. с. и тока в обмотке вращающегося ротора  $f_2 = pn_s/60 = Spn_1/60 = Sf_1$ . Э. д. с. пропорциональна частоте, и, следовательно, в фазе обмотки вращающегося ротора будет создана э. д. с.  $E_{2s} = f_2 E_2 / f_1 = S E_2$ . Индуктивное сопротивление фазы обмотки вращающегося ротора также пропорционально частоте:  $X_{2s} = S X_2$ . Активное сопротивление обмотки ротора не зависит от частоты (пренебрегая поверхностным эффектом):  $r_2 = \text{const}$ .

Таким образом, ток в фазе замкнутой накоротко обмотки вращающегося ротора

$$I_{2s} = E_{2s} / \sqrt{r_2^2 + X_{2s}^2} = S E_2 / \sqrt{r_2^2 + (S X_2)^2},$$

$$\text{или } I_{2s} = E_2 / \sqrt{(r_2/S)^2 + X_2^2}. \quad (21.2)$$

Таким образом, ток в роторе зависит от скольжения, и если скольжение уменьшается, то ток в роторе также уменьшается, так как уменьшается э. д. с. в обмотке ротора.

Выражение (21.2) представляет собой изменение тока в роторе, происходящее за счет изменения активного сопротивления, так же, как при работе трансформатора на активную нагрузку. При работе двигателя это активное сопротивление фазы обмотки ротора  $r_2/S = r_2 + r_d = r_2 + r_2(1-S)/S$ .

На рис. 21.1, а показана эквивалентная схема фазы неподвижного ротора, а на рис. 21.1, б — фазы вращающегося ротора, где  $r_d = r_2(1-S)/S$  — активное сопротивление, эквивалентное действию тормозного момента или полезной мощности на валу машины. При холостом ходе (в идеальном случае — при отсутствии потерь)  $S=0$  и  $r_d=\infty$ , т. е. полезная мощность равна нулю. При увеличении нагрузки или полезной мощности скольжение увеличивается, а  $r_d$  уменьшается.

## § 21.2. Векторная диаграмма и эквивалентная схема асинхронного двигателя

При работе двигателя в обмотке его ротора протекает переменный ток, частота которого  $f_2 = Sf_1$ . Так как обмотка ротора многофазная, то этот ток создает магнитное поле, вращающееся относительно ротора с частотой, зависящей от частоты тока:  $60f_2/p = S60f_1/p = Sn_1 = n_s$ . Имея в виду, что ротор вращается с частотой  $n_2$ , получим частоту вращения магнитного поля ротора в пространстве:  $n_1 = n_2 + n_s$ . Таким образом, магнитные поля, создаваемые токами в статоре и роторе, вращаясь в пространстве синхронно, остаются неподвижными друг относительно друга и между этими полями имеет место установившееся взаимодействие.

Пренебрегая падением напряжения в активном и реактивном сопротивлениях обмотки статора, можно считать, что приложенное напряжение сети уравновешенно э. д. с., созданной в обмотке статора:  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$ . Поэтому при неизменном приложенном напряжении  $U_1$  э. д. с.  $E_1$ , а значит и магнитный поток, создающий эту э. д. с., остаются практически неизменными. Следовательно, в результате совместного действия н. с. обмоток статора и ротора устанавливается практически неизменный магнитный поток, равный магнитному потоку при х. х. При х. х. (без учета потерь)  $S=0$  и тока в роторе нет, по обмотке статора протекает ток х. х.  $I_0$ , а н. с.  $m_1 k_{061} \omega_1 I_0$  создает вращающееся магнитное поле. На основании равновесия н. с. может записать следующее уравнение:  $m_1 k_{061} \omega_1 \dot{I}_1 + m_2 k_{062} \omega_2 \dot{I}_{2s} = m_1 k_{061} \omega_1 \dot{I}_0$ , или  $m_1 k_{061} \omega_1 \dot{I}_1 = m_1 k_{061} \omega_1 \dot{I}_0 - m_2 k_{062} \omega_2 \dot{I}_{2s}$ . Откуда

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - m_2 k_{062} \omega_2 \dot{I}_{2s} / (m_1 k_{061} \omega_1) = \dot{I}_0 - \dot{I}'_{2s}. \quad (21.3)$$

Выражение (21.3) показывает, что ток в обмотке статора  $I_1$  создает неизменный магнитный поток (составляющая  $I_0$ ) и уравновешивает размагничивающее действие тока обмотки ротора  $I'_{2s}$ . Поэтому всякое изменение тока в роторе будет вызывать соответствующее изменение тока статора. Если, например, увеличить на-

грузку на валу двигателя, то увеличатся скольжение, токи в обмотке ротора и, следовательно, в обмотке статора.

Уравнение равновесия э. д. с. для фазы обмотки статора имеет следующий вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1, \quad (21.4)$$

где  $r_1$  и  $X_1$  — активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки статора.

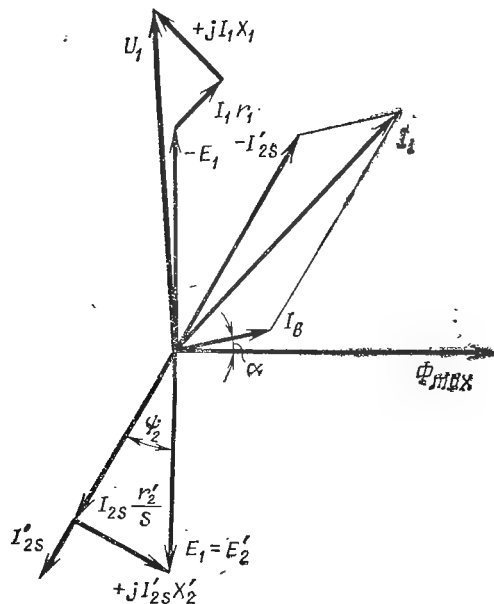


Рис. 21.2. Векторная диаграмма для одной фазы асинхронного двигателя

вектор основного магнитного потока  $\Phi_{\text{max}}$ , созданного током х. х.  $I_0$ , опережающим магнитный поток на угол гистерезисного опережения  $\alpha$ . Магнитный поток создает в фазах обмоток статора и ротора э. д. с.  $E_1$  и  $E_2'$ , отстающие от магнитного потока на  $\pi/2$ . Обмотка ротора имеет активное  $r_2'/S$  и реактивное  $X_2'$  сопротивление и, следовательно, ток в роторе  $I_{2s}'$  отстает от э. д. с.  $E_2'$  на угол  $\psi_2 = \arctg(SX_2/r_2)$ . Вектор  $I_{2s}' r_2'/S$  совпадает по направлению с вектором тока  $I_{2s}'$ , и вектор  $j I_{2s}' X_2'$  повернут на  $\pi/2$  в сторону опережения относительно вектора тока  $I_{2s}'$ , а геометрическая сумма векторов  $I_{2s}' r_2'/S$  и  $j I_{2s}' X_2'$  равна вектору  $E_2'$  на основании (21.6). Вектор тока статора определится на основании (21.3), а вектор приложенного напряжения  $U_1$  — на основании уравнения (21.4).

Не имея принципиального отличия, в количественном отношении векторная диаграмма асинхронного двигателя существенно отлич-

Так как обмотка ротора замкнута накоротко ( $U_2=0$ ), уравнение равновесия э. д. с. для фазы этой обмотки будет:  $\dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s} r_2 + j \dot{I}_{2s} X_{2s}$  или  $S \dot{E}_2 = \dot{I}_{2s} r_2 + j \dot{I}_{2s} S X_2$ . Откуда

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_{2s}' r_2 / S + j \dot{I}_{2s}' X_2. \quad (21.5)$$

Для построения векторной диаграммы и эквивалентной схемы параметры обмотки ротора приводят к обмотке статора так же, как это было в трансформаторах, после приведения (21.5) примет следующий вид:

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_{2s}' r_2' / S + j \dot{I}_{2s}' X_2'. \quad (21.6)$$

Векторная диаграмма для одной фазы асинхронного двигателя (рис. 21.2) подобна векторной диаграмме трансформатора. По горизонтальной оси отложен

на от векторной диаграммы трансформатора. Это отличие заключается в следующем:

1. Ток холостого хода в асинхронных машинах значительно больше, чем в трансформаторах. В асинхронных машинах ток х. х. составляет 25÷40%, а при очень малых мощностях достигает 70% и выше. Такое большое значение тока х. х. в машине объясняется наличием воздушного зазора между статором и ротором, резко увеличивающим магнитное сопротивление, что вызывает увеличение потребления реактивного намагничивающего тока, создающего магнитный поток.

2. Реактивные сопротивления обмоток статора и ротора асинхронной машины значительно больше реактивных сопротивлений обмоток трансформатора. Это объясняется тем, что в трансформаторах потоки рассеяния, замыкаясь через воздух, встречают на своем пути большие магнитные сопротивления, поэтому невелики. В машинах обмотки статора и ротора, помещаемые в пазах, окружены сталью и потоки рассеяния значительно больше.

3. Активные сопротивления обмоток асинхронной машины также несколько больше активных сопротивлений обмоток трансформатора. Это объясняется тем, что в машине лучше условия охлаждения, чем в трансформаторах, за счет наличия вращающихся частей, и, следовательно, допускаются большие плотности тока.

Приняв  $Z_1 = r_1 + jX_1$  и  $Z'_{2s} = r'_2/S + jX'_2$ , запишем уравнения (21.3), (21.4) и (21.6) в следующем виде:

$$\dot{I}_{2s} = \dot{I}_0 - I_1; \quad (21.7)$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \quad (21.8)$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}_{2s} Z'_{2s}. \quad (21.9)$$

Обозначим

$$-\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2 = \dot{I}_0 Z_0, \quad (21.10)$$

где  $Z_0 = r_0 + jX_0$  — активное сопротивление, эквивалентное потерям в стали сердечника статора;  $X_0$  — индуктивное сопротивление, эквивалентное действию основного магнитного потока на обмотку статора.

Из (21.7), (21.9) и (21.10) получим

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 Z'_{2s} / (Z_0 + Z'_{2s}) \quad (21.11)$$

и из (21.8), (21.10) и (21.11) имеем

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 [Z_1 + Z_0 Z'_{2s} / (Z_0 + Z'_{2s})]. \quad (21.12)$$

Выражение (21.12) показывает, что каждая фаза асинхронного двигателя может быть представлена полной эквивалентной схемой (рис. 21.3, а), состоящей из двух последовательно соединенных сопротивлений, — полного сопротивления фазы обмотки статора  $Z_1$  и сопротивления  $Z_0 Z'_{2s} / (Z_0 + Z'_{2s})$ , состоящего из двух параллельных

ветвей с сопротивлением  $Z_0$  и  $Z'_{2s}$ . В дальнейшем для упрощения выражения вращающего момента двигателя и для удобства построения круговой диаграммы мы будем пренебрегать током  $I_0$ , считая  $I_1 = -I'_{2s}$ .

Упрощенная эквивалентная схема фазы двигателя показана на рис. 21.3, б. Из этой схемы приведенный ток фазы обмотки ротора

$$I'_{2s} = U_1 / \sqrt{(r_1 + r'_2 S)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (21.13)$$

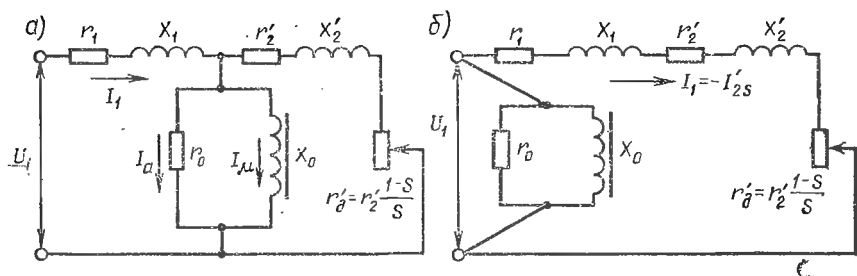


Рис. 21.3. Эквивалентные схемы асинхронного двигателя

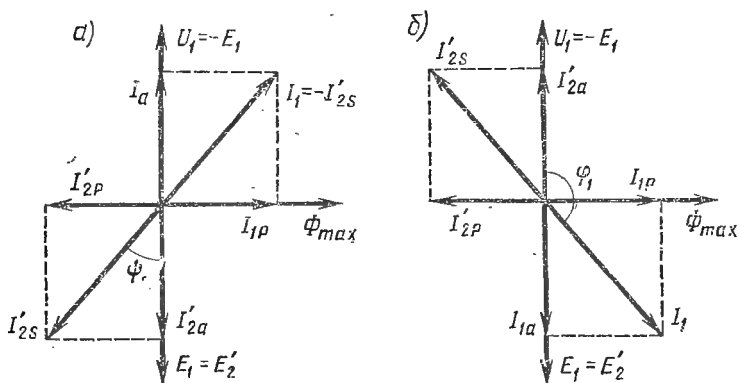


Рис. 21.4. Упрощенная векторная диаграмма асинхронного двигателя (а) и генератора (б)

Из упрощенной эквивалентной схемы, пренебрегая падением напряжения в сопротивлении обмотки статора  $Z_1 = r_1 + jX_1$ , т. е. считая  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$ , построим упрощенную векторную диаграмму асинхронного двигателя (рис. 21.4, а). Так как токи статора и приведенного ротора равны и противоположно направлены ( $I_1 = -I'_{2s}$ ), то и активные и реактивные составляющие этих токов также равны и противоположно направлены:  $I_{1a} = -I'_{2a}$  и  $I_{1p} = -I'_{2p}$ .

Из упрощенной диаграммы видно, что активная составляющая тока статора совпадает с напряжением, т. е. двигатель потребляет

электрическую энергию из сети, преобразуя ее в механическую, а реактивная составляющая тока статора отстает от напряжения на  $\pi/2$ , т. е. двигатель потребляет из сети реактивную мощность, необходимую для создания магнитного потока.

Активная составляющая тока ротора пропорциональна первой степени скольжения, а реактивная составляющая пропорциональна второй степени скольжения:

$$\left. \begin{aligned} I'_{2a} &= I'_{2s} \cos \Psi_2 = \frac{\bar{E}'_{2s}}{\sqrt{(r'_2)^2 + (X'_{2s})^2}} \cdot \frac{r'_2}{\sqrt{(r'_2)^2 + (X'_{2s})^2}} = \\ &= S \frac{E'_2 r'_2}{(r'_2)^2 + (X'_{2s})^2} \propto S; \\ I'_{2p} &= I'_{2s} \sin \Psi_2 = \frac{\bar{E}'_{2s}}{\sqrt{(r'_2)^2 + (X'_{2s})^2}} \cdot \frac{X'_{2s}}{\sqrt{(r'_2)^2 + (X'_{2s})^2}} = \\ &= S^2 \frac{E'_2 X'_2}{(r'_2)^2 + (X'_{2s})^2} \propto S^2. \end{aligned} \right\} \quad (21.14)$$

### § 21.3. Работа асинхронной машины генератором и тормозом

Асинхронная машина так же, как и любая электрическая машина, обратима, т. е. может работать и двигателем и генератором. Если предположить, что ротор асинхронной машины вращается каким-либо первичным двигателем с частотой, большей частоты вращающегося поля статора  $n_2 > n_1$ , т. е. скольжение отрицательно  $S = (n_1 - n_2)/n_1 < 0$ , то на валу машины будет создан тормозной момент и машина не вырабатывает, а потребляет механическую энергию. При изменении знака скольжения активная составляющая тока ротора, пропорциональная первой степени скольжения, изменит знак, а реактивная составляющая, пропорциональная квадрату скольжения, знака не изменит. Упрощенная векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 21.4, б. Из нее видно, что активная составляющая тока статора  $I_{1a} = -I'_{2a}$  изображена вектором, повернутым относительно вектора приложенного напряжения на угол  $\pi$ , т. е. потребляемая мощность из сети  $P_{эл} = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$  стала отрицательной, так как  $\varphi_1 > \pi/2$  и, следовательно, машина отдает в сеть электрическую энергию. Таким образом, при отрицательном скольжении ( $n_2 > n_1$ ) асинхронная машина потребляемую механическую энергию преобразовывает в энергию электрическую, т. е. работает генератором.

На упрощенной векторной диаграмме показано, что реактивная составляющая тока статора  $I'_{2p}$  знака не меняет при изменении знака скольжения. Это значит, что асинхронная машина при работе генератором потребляет реактивную мощность так же, как и

при работе двигателем. Эта реактивная мощность необходима для возбуждения магнитного поля. Следовательно, асинхронная машина может генерировать только активную мощность и для работы асинхронного генератора необходим какой-либо источник реактивной мощности. Таким источником может быть синхронный генератор, работающий параллельно с асинхронным генератором.

Возможно самовозбуждение асинхронного генератора. Для этого обмотки статора соединяют с батареей конденсаторов (рис. 21.5). Сердечник ротора обладает некоторым (обычно малым)

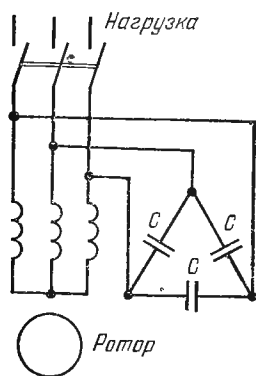


Рис. 21.5. Схема самовозбуждения асинхронного генератора

остаточным магнетизмом  $\Phi_0$ . При вращении ротора каким-либо первичным двигателем в каждой фазе обмотки статора будет индуцирована э. д. с.  $E_0$  остаточным потоком ротора, отстающая от потока на  $\pi/2$ . При включении обмоток статора на емкость под действием  $E_0$  протекает ток  $I_c$ , опережающий  $E_0$  на  $\pi/2$ . Этот ток создает магнитный поток  $\Phi_c$ , направленный согласно с потоком  $\Phi_0$ , вследствие чего общий магнитный поток увеличивается, вызывая увеличение э. д. с. и тока в статоре. При повышении тока статора происходит дальнейшее увеличение магнитного потока, что вновь увеличит э. д. с. и ток статора и т. д., т. е. генератор возбуждается. Этот процесс будет протекать, пока э. д. с. обмотки статора не окажется уравновешенной падением напряжения в емкостном сопротивлении. Напряже-

ние, устанавливающееся на зажимах генератора, зависит от величины емкости. При увеличении емкости напряжение на зажимах генератора увеличивается. Для уменьшения емкости конденсаторов следует обмотки статора соединять звездой, а конденсаторы — треугольником. При работе асинхронного генератора параллельно с сетью частота тока сети постоянна. При работе генератора с самовозбуждением изменение нагрузки вызывает изменение частоты тока. Для поддержания постоянства частоты надо при увеличении нагрузки увеличить частоту вращения ротора.

Тормозной режим работы асинхронной машины будет в том случае, когда поле статора и ротор вращаются в противоположных направлениях. При этом частота вращения ротора окажется отрицательной и скольжение  $S = [n_1 - (-n_2)]/n_1 = (n_1 + n_2)/n_1 > 1$ .

Практически режим электромагнитного тормоза применяют для быстрой остановки или для уменьшения скорости спуска груза на кранах и подъемниках. Для этой цели изменяют чередования фаз статора, переключая два провода, которые включают обмотки статора в сеть. При этом изменяется на обратное направление вращения поля статора тогда, когда ротор двигателя по инерции или под действием опускаемого груза продолжает вращаться в прежнем направлении. Развиваемый машиной момент  $M_\Phi$  направлен по

направлению вращения поля статора или встречно направленному движению ротора, т. е. является тормозным. Так как скольжение велико ( $S > 1$ ), то и э. д. с. в роторе при работе тормозом будет большой.

Для уменьшения тока в роторе и, следовательно, в статоре обмотку ротора (фазного) замыкают на активное сопротивление — тормозной реостат, который помимо ограничения бросков тока в роторе и статоре увеличивает тормозной момент машины, так же как включение пускового реостата в цепь ротора увеличивает пусковой момент двигателя.

## Глава 22

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

#### § 22.1. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

За время  $dt$  электрическая энергия  $P_1 dt$ , потребляемая асинхронным двигателем из сети, преобразовывается в механическую  $P_2 dt$ . При работе машины неизбежно происходит потеря преобразуемой ею энергии и, следовательно, потребляемая двигателем мощность  $P_1$  будет больше полезной  $P_2$ , развиваемой на валу двигателя.

Процесс преобразования энергии и потери, происходящие при работе двигателя, можно иллюстрировать энергетической диаграммой (рис. 22.1). Потребляемая двигателем мощность из сети  $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1$  частично расходуется на покрытие потерь в обмотках статора  $P_{M1} = m_1 I_1^2 r_1$  и в стали сердечника статора  $P_{C1}$  на гистерезис и вихревые токи. Оставшаяся часть мощности  $P_{ЭМ} = P_1 - P_{M1} - P_{C1}$ , называемая электромагнитной, передается ротору через воздушный зазор вращающимся магнитным полем. Энергия, полученная ротором, преобразуется в механическую и частично расходуется на покрытие потерь в роторе. На диаграмме показано, что электромагнитная мощность, поступающая на ротор, может быть представлена в виде суммы двух мощностей:  $P_{ЭМ} = P_2' + P_{M2}$ , где  $P_2'$  — мощность, развиваемая вращающимся ротором, т. е.  $P_2' dt$  — энергия, преобразованная двигателем в механическую;  $P_{M2}$  — потери в меди обмоток ротора.

Так как сердечник ротора при работе двигателя перемагничивается с малой частотой  $p n_s / 60 = f_2 = S f_1$ , то потери в стали ротора будут также малы (на энергетической диаграмме они не показаны).

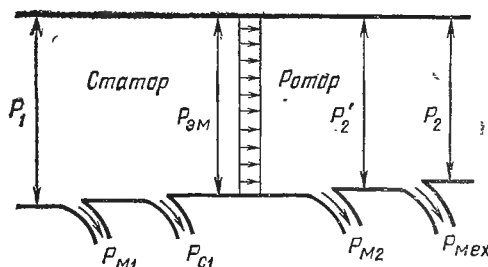


Рис. 22.1. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя



Не вся энергия, преобразованная машиной в механическую ( $P_2' dt$ ), является полезной энергией  $P_2 dt$ , так как часть ее расходуется на покрытие механических потерь  $P_{\text{мех}} dt$  от трения в подшипниках и о воздух вращающихся частей машины. Таким образом, мощность, развиваемая вращающимся ротором,  $P_2' = P_2 + P_{\text{мех}}$ . Из энергетической диаграммы следует, что

$$P_{\text{эм}} - P_2' = P_{\text{м2}}. \quad (22.1)$$

Так как мощность может быть представлена произведением момента, развиваемого машиной, на угловую частоту, то (22.1) можно придать следующий вид:

$$M\Omega_1 - M\Omega_2 = P_{\text{м2}} = m_2 I_{2s}^2 r_2, \quad (22.2)$$

где  $M$  — электромагнитный момент, развиваемый машиной;  $\Omega_1, \Omega_2$  — угловые частоты вращения поля статора и ротора;  $m_2$  — число фаз ротора;  $I_{2s}$  — ток в фазе обмотки вращающегося ротора;  $r_2$  — активное сопротивление фазы обмотки ротора.

Выражение (22.2) можно преобразовать к виду  $M\Omega_1 - M\Omega_2 = M\Omega_1(\Omega_1 - \Omega_2)/\Omega_1 = P_{\text{эм}} S$ , откуда

$$P_{\text{м2}} = SP_{\text{эм}}, \quad (22.3)$$

т. е. потери в меди обмотки ротора определяются произведением скольжения на электромагнитную мощность. Из (22.3) получим

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{м2}}/S = m_2 I_{2s}^2 r_2 / S, \quad (22.4)$$

или после приведения параметров обмотки ротора к цепи статора

$$P_{\text{эм}} = m_1 (I_{2s}')^2 r_2' / S. \quad (22.5)$$

## § 22.2. Электромагнитный момент асинхронной машины

Момент, развиваемый машиной,

$$M = P_{\text{эм}}/\Omega_1 = 60P_{\text{эм}}/(2\pi n_1) = pP_{\text{эм}}/(2\pi f_1),$$

где  $\Omega_1 = 2\pi n_1/60 = 2\pi f_1/p$  — угловая частота вращения поля статора.

Электромагнитная мощность, поступающая на ротор,  $P_{\text{эм}} = m_2 E_2 I_{2s} \cos \Psi_2 = m_1 E_2' I_{2s}' \cos \Psi_2$ .

Так как  $E_2' = E_1 = 4,44k_{\text{об1}}\omega_1 f_1 \Phi$ , получим, что

$$P_{\text{эм}} = m_1 4,44k_{\text{об1}}\omega_1 f_1 \Phi I_{2s}' \cos \Psi_2,$$

$$M = [4,44k_{\text{об1}}m_1 p \omega_1 / (2\pi)] \Phi I_{2s}' \cos \Psi_2.$$

Обозначив  $4,44k_{\text{об1}}m_1 p \omega_1 / (2\pi) = C$ , где  $C$  — постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных данных машины, найдем, что электромагнитный момент зависит от магнитного потока и активной составляющей тока в роторе:

$$M = C \Phi I_{2s}' \cos \Psi_2. \quad (22.6)$$

Из энергетической диаграммы была получена  $P_{\text{эм}} = P_{\text{м2}}/S = = m_1 (I'_{2s})^2 r'_2 / S$ , тогда  $M = [p / (2\pi f_1)] m_1 (I'_{2s})^2 r'_2 / S$ .

Из эквивалентной схемы асинхронной машины выражение для тока в фазе ротора  $I'_{2s} = U_1 / \sqrt{(r_1 + r'_2/S)^2 + (X_1 + X'_2)^2}$ , где  $U_1$  — напряжение, приложенное к фазе обмотки статора. Подставив это значение тока в выражение электромагнитного момента, получим

$$M = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 r'_2 / S}{(r_1 + r'_2/S)^2 + (X_1 + X'_2)^2}. \quad (22.7)$$

В (22.7) все величины, кроме  $S$ , постоянны, поэтому оно представляет собой зависимость электромагнитного момента от скольжения (рис. 22.2). Кривая электромагнитного момента поясняется выражением (22.6). Так как при постоянстве приложенного напряжения амплитуда магнитного потока  $\Phi$  остается также практически постоянной, то электромагнитный момент пропорционален активной составляющей тока в роторе:  $M \sim I_{2s} \cos \Psi_2$ .

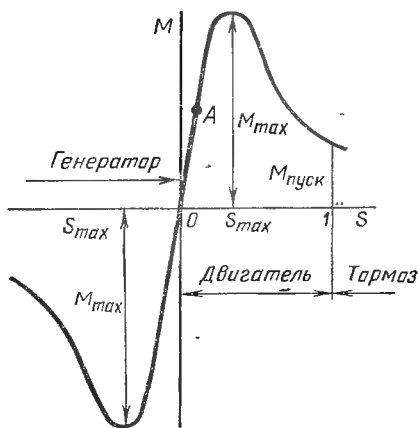


Рис. 22.2. Зависимость электромагнитного момента асинхронной машины от скольжения

В фазе ротора ток  $I_{2s} = E_{2s} / \sqrt{r_2^2 + X_{2s}^2} = SE_2 / \sqrt{r_2^2 + (SX_2)^2}$ , а  $\cos \Psi_2 = r_2 / \sqrt{r_2^2 + X_{2s}^2} = r_2 / \sqrt{r_2^2 + (SX_2)^2}$ .

При увеличении скольжения  $I_{2s}$  повышается, а  $\cos \Psi_2$  уменьшается. При небольших скольжениях ( $S < S_{\text{max}}$ ) угол  $\Psi_2$  мал и  $\cos \Psi_2$  уменьшается медленно с увеличением скольжения так, что активная составляющая тока ротора и электромагнитный момент растут. При больших скольжениях ( $S > S_{\text{max}}$ ) угол  $\Psi_2$  становится большим и увеличение скольжения вызывает уменьшение  $\cos \Psi_2$  в большей степени, чем увеличение тока ротора так, что при дальнейшем увеличении скольжения происходит уменьшение активной составляющей тока ротора и электромагнитного момента машины.

Если вращающий момент асинхронного двигателя уравновешен тормозным моментом на его валу:  $M = M_{\text{т}}$ , то частота вращения ротора неизменна. При нарушении равновесия моментов происходит изменение частоты вращения ротора. При работе машины на восходящей ветви зависимости момента от скольжения (точка А) непрерывного изменения скорости не происходит.

В режиме генератора устойчивая работа машины также возможна лишь при изменении скольжения от 0 до  $S_{\max}$ . При работе генератором электромагнитный момент имеет большие значения, чем при работе двигателем. Это видно из выражения (22.7), где для двигателя в знаменателе будет  $(r_1 + r_2'/S)^2$ , а для генератора  $-(r_1 - r_2'/S)^2$ , так как при работе генератором скольжение отрицательно.

### § 22.3. Пусковой и максимальный моменты асинхронного двигателя

При пуске асинхронного двигателя ротор его неподвижен ( $n_2=0$ ), т. е. скольжение равно единице. Если в выражение вращающего момента двигателя (22.7) подставить  $S=1$ , то пусковой момент

$$M_{\text{пуск}} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 r_2'}{(r_1 + r_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}. \quad (22.8)$$

Обычно в асинхронных двигателях пусковой момент  $M_{\text{пуск}} = (0,8 \div 1,5) M_{\text{ном}}$ , где  $M_{\text{ном}}$  — номинальный момент машины.

Максимальный, или опрокидывающий, момент машины мы найдем, взяв производную  $dM/dS$  и приравняв ее нулю. Из полученного равенства определим скольжение  $S_{\max}$ , при котором момент будет максимален:

$$\frac{dM}{dS} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 r_2' [S(r_1 + r_2'/S)^2 + S(X_1 + X_2')^2]'}{S^2 [(r_1 + r_2'/S)^2 + (X_1 + X_2')^2]} = 0.$$

$$\text{Откуда } \left[ S \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + S(X_1 + X_2')^2 \right]' = 0,$$

$$\text{или } r_1^2 + (X_1 + X_2')^2 - (r_2'/S_{\max})^2 = 0.$$

Таким образом, скольжение, соответствующее максимальному моменту,

$$S_{\max} = r_2' / \sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_2')^2}. \quad (22.9)$$

Подставив значение  $S_{\max}$  в выражение вращающего момента, найдем максимальный момент

$$M_{\max} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{2 \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)}, \quad (22.10)$$

который определяет перегрузочную способность двигателя. Обычно у асинхронных двигателей  $M_{\max} = (1,6 \div 2,5) M_{\text{ном}}$ , в двигателях специального исполнения  $M_{\max} = (2,5 \div 3) M_{\text{ном}}$ .

Выражения (22.9) и (22.10) показывают, что максимальный момент не зависит от активного сопротивления в обмотке ротора, а скольжение, соответствующее максимальному моменту, пропорционально этому сопротивлению. Таким образом, при увеличении активного сопротивления в роторе максимальный момент, не меняясь по величине, перемещается в область больших скольжений (рис. 22.3). Эти кривые показывают, что при увеличении в некоторых пределах активного сопротивления в обмотке ротора повышается пусковой момент, так как растет активная составляющая тока в роторе.

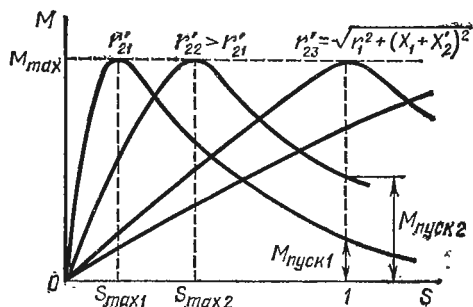


Рис. 22.3. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения при различных сопротивлениях обмотки ротора

## § 22.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости скольжения  $S$ , частоты вращения ротора  $n_2$ , развиваемого момента  $M$ , потребляемого тока  $I_1$  и мощности  $P_1$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi$  и к. п. д.  $\eta$  от полезной мощности вала машины  $P_2$ . Эти характеристики (рис. 22.4) снимают при естественных условиях работы двигателя, когда двигатель нерегулируемый, частота тока  $f_1$  и напряжение  $U_1$  сети остаются постоянными, а изменяется только нагрузка на валу двигателя.

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение возрастает, причем быстрее при больших нагрузках, чем при малых. При номинальной нагрузке обычно скольжение  $S_{\text{ном}} = 1,5 \div 5\%$ .

Частота вращения ротора  $n_2 = n_1(1 - S) = 60f_1(1 - S)/p$ . Так как при повышении нагрузки на валу скольжение увеличивается, то частота вращения ротора уменьшается. Однако частота изменяется обычно не более чем на 5% при изменении нагрузки от 0 до номинальной, и скоростная ха-

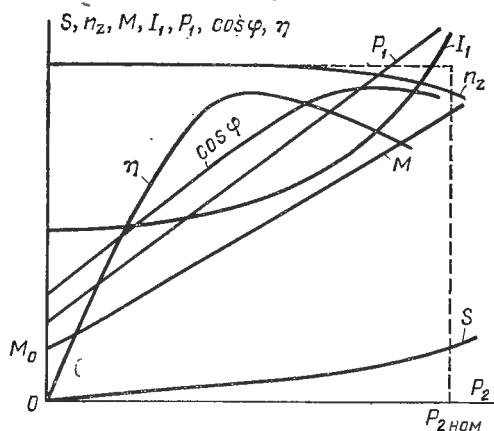


Рис. 22.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

характеристика асинхронного двигателя представляет жесткую зависимость, имеющую очень малый наклон к горизонтальной оси.

Вращающий момент  $M$ , развиваемый двигателем, уравновешен тормозным моментом на валу  $M_T$  и моментом  $M_0$ , идущим на преодоление механических потерь двигателя:

$$M = M_T + M_0 = P_2 / \Omega_2 + M_0 = P_2 / (2\pi n_2 \cdot 60) + M_0.$$

При х. х. двигателя вращающий момент  $M = M_0$ , и с увеличением нагрузки на валу этот момент растет, причем за счет некоторого уменьшения частоты вращения ротора увеличение вращающего момента двигателя происходит быстрее, чем увеличение полезной мощности на валу, и кривая вращающего момента незначительно отклоняется вверх от прямой линии.

Ток  $I_1$ , потребляемый двигателем из сети, неравномерно изменяется при увеличении нагрузки на валу. При х. х.  $\cos \varphi$  мал, и ток имеет большую реактивную составляющую и очень малую активную. При малых нагрузках на валу двигателя активные составляющие токов ротора и статора малы по сравнению с реактивными. Поэтому изменение нагрузки, т. е. изменение активной составляющей тока в роторе и статоре, вызывает незначительное изменение этих токов. При больших нагрузках активные составляющие токов ротора и статора становятся больше реактивных и изменение нагрузки на валу двигателя вызывает значительное изменение токов в роторе и статоре.

Потребляемая мощность  $P_1$  имеет примерно линейную зависимость. Ее незначительное отклонение вверх объясняется увеличением потерь в меди обмоток статора и ротора с увеличением нагрузки.

Изменение коэффициента мощности при изменении нагрузки на валу двигателя происходит следующим образом. При х. х.  $\cos \varphi$  мал, так как активная составляющая тока статора, расходуемая на покрытие потерь в машине, мала по сравнению с реактивной составляющей этого тока, создающей магнитный поток. При увеличении нагрузки на валу  $\cos \varphi$  резко повышается, достигая наибольшего значения (0,8—0,9) за счет роста активной составляющей тока статора. При очень больших нагрузках происходит некоторое уменьшение  $\cos \varphi$ , так как за счет значительного увеличения скольжения и частоты тока в роторе растет реактивное сопротивление обмотки ротора.

К. п. д. имеет такую же зависимость, как в любой машине или трансформаторе. При холостом ходе к. п. д. = 0. При повышении нагрузки на валу к. п. д. резко увеличивается, достигая наибольшего значения при некоторой нагрузке, а затем незначительно уменьшается. Наибольшее значение к. п. д. имеет машина при нагрузке, для которой постоянные потери равны переменным. *Постоянные потери*, не зависящие от нагрузки, складываются из механических и потерь в стали статора. *Переменные потери* — это потери, изме-

няющиеся при изменении нагрузки двигателя (потери в меди обмоток и добавочные потери).

**Повышение коэффициента мощности асинхронных двигателей.** Основным недостаток асинхронных двигателей — низкий коэффициент мощности  $\cos \varphi$ . Для повышения  $\cos \varphi$  применяют следующие меры: 1. Выбирают мощность двигателя в строгом соответствии с нагрузкой, так как работа двигателя при недогрузке влечет за собой низкий  $\cos \varphi$  двигателя. 2. Параллельно двигателю или группе двигателей включают статические конденсаторы, которые своей емкостью компенсируют сдвиг фаз, обусловленный двигателями, потребляющими реактивный ток для возбуждения магнитного поля. 3. В случаях, когда асинхронный двигатель по условиям производственного процесса длительно работает с нагрузкой меньше 50% номинальной мощности и имеет обмотку статора, допускающую переключение с треугольника на звезду, то при малых нагрузках обмотку статора двигателя, соединяемую при нормальной нагрузке треугольником, переключают в звезду. При этом фазное напряжение понижается в  $\sqrt{3}$  раз, вследствие чего магнитный поток уменьшается тоже примерно в  $\sqrt{3}$  раз, что уменьшает реактивный намагничивающий ток и потери в стали, повышает  $\cos \varphi$  и к. п. д. двигателя.

## **Глава 23**

### **КРУГОВАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ**

#### **§ 23.1. Обоснование и построение круговой диаграммы**

**Обоснование круговой диаграммы.** Характеристики асинхронного двигателя, определяющие его работу (пусковые, рабочие и регулировочные), могут быть определены путем непосредственной нагрузки машины. Однако этот метод требует громоздкой аппаратуры, вызывает затрату электрической энергии, отнимает много времени и не обеспечивает высокой точности. Все эти характеристики могут быть определены (косвенным методом) с помощью круговой диаграммы, для построения которой нужно произвести только два опыта — х. х. и к. з. — и измерить активное сопротивление обмотки статора. При этом следует иметь в виду, что круговую диаграмму строят лишь для ненасыщенных двигателей с постоянными параметрами и синусоидальным изменением переменных величин (напряжения, тока, н. с. и др.). К таким двигателям близки двигатели нормального исполнения, но для двигателей специального исполнения, например глубокопазных и с двойной беличьей клеткой на роторе, имеющих переменные параметры, может быть построено геометрическое место концов вектора тока статора, значительно отличающееся от окружности.

Из упрощенной эквивалентной схемы, изображенной на рис.

21.3, б, можно записать для приведенного для приведенного тока ротора:

$$I'_{2s} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2/S)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{U_1}{X_1 + X'_2} \times$$

$$\times \frac{X_1 + X'_2}{\sqrt{(r_1 + r'_2/S)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{U_1}{X_1 + X'_2} \sin \varphi. \quad (23.1)$$

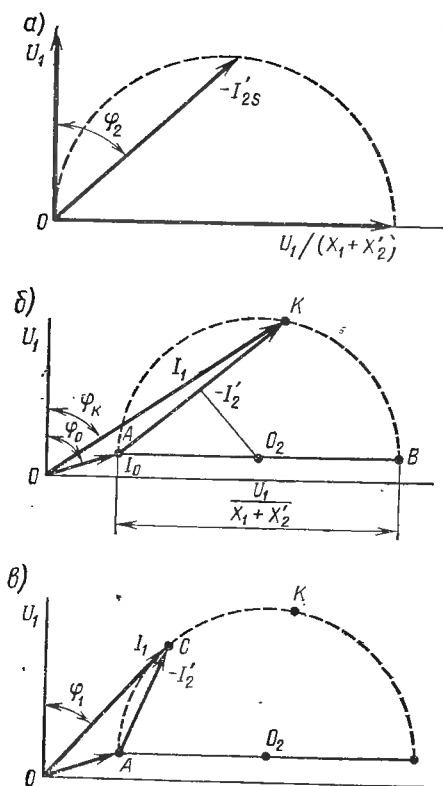


Рис. 23.1. Круговые диаграммы для приведенного тока ротора (а) и асинхронного двигателя (б) и определение токов статора и ротора из круговой диаграммы (в)

Это выражение является уравнением окружности в полярных координатах, и, следовательно, геометрическим местом концов вектора приведенного тока ротора является окружность с диаметром, равным  $U_1/(X_1 + X'_2)$  (рис. 23.1, а).

Упрощенная эквивалентная схема асинхронной машины дает возможность упростить обоснование и построение круговой диаграммы, не лишая ее необходимой точности. Упрощение состоит в том, что намагничивающий контур выносят на внешние зажимы с неизменным напряжением  $U_1$ . При этом мы получаем два контура — основной и намагничивающий, включенные каждый в сеть с неизменным напряжением и работающие независимо один от другого. Ошибка, которую мы допускаем при этом упрощении, оказывается ничтожно малой.

Уравнение равновесия н. с. статора и ротора имеет следующий вид:  $I_1 = I_0 - I'_2$ .

При включении намагничивающего контура в сеть с неизменным напряжением  $U_1$  его параметры  $r_0$  и  $X_0$  и ток  $I_0$  остаются неизменными при неиз-

менном фазном сдвиге  $\varphi_0$ . Поэтому геометрическим местом концов вектора тока статора будет та же окружность, что и для тока ротора.

**Построение круговой диаграммы.** Для построения круговой диаграммы асинхронного двигателя необходимо определить две точки

(А и К на рис. 23.1, б). Для этого нужно произвести опыты х. х. и к. з.

Опыт х. х. производят при номинальных напряжении  $U_1$  и частоте  $f_1$ . Ток х. х.  $I_0$  отстает от напряжения сети  $U_1$  на угол  $\varphi_0$ . Потребляемая двигателем мощность  $P_0$  расходуется на покрытие потерь в стали  $P_c$ , в обмотке статора  $m_1 I_0^2 r_1$ , механических  $P_{\text{мех}}$  и добавочных  $P_d$ :

$$P_0 = P_c + m_1 I_0^2 r_1 + P_{\text{мех}} + P_d. \quad (23.2)$$

Тогда

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (m_1 I_0 U_1). \quad (23.3)$$

Зная  $I_0$  и  $\cos \varphi_0$ , можно определить на круговой диаграмме точку А.

Опыт к. з. производят при заторможенном роторе и пониженном напряжении  $U_k$ , подводимом к обмотке статора, которое обычно составляет  $15 \div 25\%$  номинального значения. Измеренные при опыте к. з. ток  $I_k$  и мощность  $P_k$  пересчитываются на номинальное напряжение. Если параметры к. з. ( $r_k$  и  $X_k$ ) можно считать постоянными, то ток, мощность и  $\cos \varphi_k$  определяются следующими соотношениями:

$$I_{k, \text{ном}} = I_1 = I_k U_{\text{ном}} / U_k; \quad P_{k, \text{ном}} = P_k (U_{\text{ном}} / U_k)^2; \quad \cos \varphi_k = P_k / (m_1 U_k I_k). \quad (23.4)$$

Зная  $I_{k, \text{ном}}$  и  $\cos \varphi_k$ , можно построить точку К, лежащую на окружности токов.

Для построения окружности токов соединяем точки А и К прямой линией (ток  $-I_2'$ ) и из ее середины восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с прямой АВ, проведенной из точки А параллельно оси абсцисс. Полученная таким образом точка  $O_2$  является центром окружности токов.

Выбрав произвольно точку С на окружности токов (рис. 23.1, в) и соединив ее с точками О и А, определим значение токов  $I_1$  и  $-I_2'$ .

## § 23.2. Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя по его круговой диаграмме

Для определения характеристик асинхронного двигателя построим круговую диаграмму (рис. 23.2). Коэффициент мощности двигателя  $\cos \varphi$  для любого значения тока определим, отложив на оси ординат отрезок  $O_f$  длиной 10 линейных единиц и построив на нем, как на диаметре, полуокружность. Продолжив вектор  $OC$  до пересечения с этой полуокружностью в точке  $h$  и измерив  $Oh$  (лин. ед.), получим  $\cos \varphi = Oh / Om = Oh / 10$ .

Подведенная к двигателю мощность  $P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1$  при неизменном напряжении сети  $U_1$  пропорциональна активной составляющей тока статора  $P_1 \sim I_1 \cos \varphi_1 = I_{a1}$ . На круговой диаграмме  $I_{a1}$



называется *линией подведенной мощности*. Для определения масштаба мощности в ваттах или киловаттах нужно разделить мощность к. з.  $P_{\text{к.ном}}$  на длину перпендикуляра  $KK_1$ , опущенного из точки  $K$  на ось абсцисс.

Потери холостого хода  $P_0$  определяют из опыта х. х. и изображают на круговой диаграмме отрезком  $AA_0$ . При увеличении нагрузки двигателя потери в стали статора и механические несколько уменьшаются, тогда как потери в стали ротора растут. Поэтому приближенно можно считать, что потери  $P_0$  остаются постоянными

и от нагрузки не зависит. Так как масштаб мощности остается неизменным, то отрезок  $AA_0$  определит мощность  $P_0$ .

При к. з. полезная мощность  $P_2=0$  и вся потребляемая мощность расходуется на покрытие потерь. Так как потери х. х.  $P_0$  мы приняли постоянными, то отрезок  $KK_3$  на круговой диаграмме определяет потери в обмотках статора и ротора. Зная сопротивление обмотки статора  $r_1$  (по измерению), определим потери в обмотке статора  $m_1 I_1^2 r_1$  (отрезок  $K_3 K_2$  на диаграмме). Отрезок  $KK_2$  на диаграмме определяет потери в обмотке ротора.

Так же, как и линия полезной мощности  $P_2$ , линия электромагнитной мощности  $P_{эм}$  представляет собой прямую, проходящую через две точки окружности токов, в которых эта мощность равна нулю. Такими точками являются точка  $A$  (механическими потерями можно пренебречь и считать, что ротор вращается синхронно с полем) и точка  $T$ , где  $S = \pm \infty$  и обмотка ротора обладает только индуктивным сопротивлением  $X_2'$ , так как активное сопротивление  $r_2'/S = 0$ . Следовательно, отрезок от любой точки окружности токов до линии  $AT$  определяет электромагнитную мощность машины в масштабе мощности.

Так как электромагнитный момент  $M = P_{эм}/\Omega_1$ , а угловая частота  $\Omega_1 = 2\pi n_1/60 = 2\pi f_1/p$  при неизменной частоте тока постоянна, то линия электромагнитной мощности является также линией электромагнитных моментов.

К. п. д. двигателя  $\eta = P_2/P_1 \cdot 100\%$ . Из круговой диаграммы мощности  $P_2$  и  $P_1$  представлены отрезками  $Cb$  и  $Ca$  соответственно, т. е.  $\eta = Cb/100/Ca$ . Так как отрезок  $ab$  мал по сравнению с отрезком  $Ca$ , то этот способ определения к. п. д. очень неточен. Лучше воспользоваться графическим методом, при котором следует определить линию суммарных потерь  $\Sigma P$ . Для этого продолжают линию полезной мощности  $P_2$  до пересечения с осью абсцисс, т. е. с линией потребляемой (подведенной) мощности  $P_1$ , в точке  $L$ . Линия суммарных потерь  $\Sigma P$  представляет собой прямую, практически параллельную оси ординат. После этого строим шкалу к. п. д., проводя прямую  $mn$  между продолженными вниз линиями полезной мощности и суммарных потерь, параллельно линии подведенной мощности. Для определения к. п. д. проведем луч  $CL$  до пересечения со шкалой к. п. д. в точке  $p$ . Из подобия треугольников  $Lmn$  и  $Lba$  имеем  $Ln/mn = ba/La$ , а из подобия треугольников  $Lnp$  и  $LCa$  имеем  $pn/Ln = La/Ca$ . Из этих выражений получим  $pn/mn = ba/Ca$  или  $mn/pn = Ca/ba$ .

Следовательно, можем записать  $(mn - pn)/mn = (Ca - ba)/Ca$ , откуда  $mp/mn = Cb/Ca = \eta$ .

Недостаток этого метода — невысокая точность.

Скольжение  $S = \frac{P_{м2}}{P_{эм}} \cdot 100\%$ .

Для определения скольжения из круговой диаграммы следует построить линию потерь в обмотке ротора  $P_{м2}$ , которая будет касательной к окружности токов в точке  $A$ , если считать, что эта точка соответствует синхронной скорости, тогда касательная пойдет

параллельно оси ординат. Строят шкалу скольжения следующим образом: между линией потерь в обмотке ротора  $P_{м2}$  и линией полезной мощности  $P_2$  проводят прямую  $qt$  параллельно линии электромагнитной мощности  $P_{эм}$ . При этом построение следует производить так, чтобы шкала скольжения удобно делилась на 100. Для определения скольжения продолжают линию  $AC$  до пересечения со шкалой скольжения в точке  $r$ . Тогда отрезок  $qr$  в процентном отношении определяет скольжение двигателя.

Максимальный момент  $M_{\max}$  из круговой диаграммы определяют следующим образом: либо строим касательную к окружности токов, параллельную линии электромагнитной мощности, либо из центра круга  $O_2$  опускают перпендикуляр на линию электромагнитной мощности и продолжают его до пересечения с окружностью токов в точке  $S$ . Легко видеть, что отрезок  $Sl$  определяет максимальный момент  $M_{\max}$  и, следовательно, перегрузочная способность двигателя  $k_{пр} = M_{\max}/M_{ном} = Sl/Cc$ .

Часть окружности токов между точками  $A$  и  $K$  соответствует работе машины двигателем, между точками  $K$  и  $T$  — тормозом и остальная часть — генератором.

### § 23.3. Уточненная круговая диаграмма

Вынесение намагничивающего контура эквивалентной схемы двигателя на внешние зажимы сильно упрощает построение круговой диаграммы. Но при этом мы допускаем некоторую ошибку, которая в двигателях средней и большой мощности практически не сказывается на конечных результатах, так что данные, полученные из уточненной круговой диаграммы, весьма близки к данным опыта при непосредственном испытании двигателя.

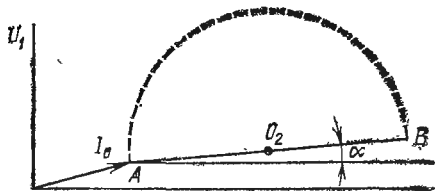


Рис. 23.3. Уточненная круговая диаграмма

Однако в двигателях малой мощности, где активные сопротивления обмоток велики, а также в двигателях, работающих при пониженных частотах, где индуктивные сопротивления уменьшаются при неизменных активных, эта ошибка становится заметной и нуждается в исправлении. Уточнение круговой диаграммы состоит в том, что при вынесении намагничивающего контура на внешние зажимы меняем параметры основного контура так, чтобы при любой нагрузке токи  $I_1$  в нормальной и упрощенной эквивалентной схемах были равны как по величине, так и по фазе. Для этого нужно умножить сопротивления контура  $Z_0$  и обмотки статора на  $c_1 = 1 + Z_1/Z_0$ , а сопротивление обмотки ротора  $Z_2'$  на  $c_1^2 = (1 + Z_1/Z_0)^2$ . В этом случае центр окруж-

ности токов  $O_2$  поворачивается на некоторый угол  $\alpha$  по направлению вращения векторов (рис. 23.3). Угол  $\alpha$  определяют из соотношения  $\operatorname{tg} \alpha = 2I_0 r_1 / U_1$ .

## Глава 24

### ПУСК И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

#### § 24.1. Пуск трехфазных асинхронных двигателей

Наиболее распространенный способ пуска асинхронных двигателей небольшой мощности — пуск непосредственным включением двигателя в сеть. Однако при таком пуске начальный или пусковой ток в несколько раз больше номинального.

При включении двигателя в сеть ротор неподвижен, и если обмотка ротора замкнута накоротко, то двигатель представляет собой трансформатор с короткозамкнутой вторичной обмоткой. При большой величине пускового тока создаются значительные электромагнитные силы, действующие на отдельные части обмотки и деформирующие ее, и перенапряжения между витками обмотки вследствие неравномерного распределения приложенного напряжения вдоль обмотки при включении. Помимо этого, броски тока нарушают нормальный режим работы сети, вызывая понижение напряжения и влияя на работу других приемников электрической энергии, работающих от этой же сети.

Несмотря на то что при непосредственном включении двигателя в сеть ток оказывается большим, начальный или пусковой момент невелик. Это объясняется тем, что при неподвижном роторе в его обмотке индуцируется э. д. с., частота которой равна частоте тока сети, и, следовательно, индуктивное сопротивление обмотки ротора велико. Поэтому активная составляющая тока ротора, определяющая вращающий момент, оказывается малой.

Пусковые свойства асинхронных двигателей характеризуются кратностью пускового тока и кратностью пускового момента.

При пуске асинхронных двигателей желательно уменьшение пускового тока и увеличение пускового момента. В двигателях с фазным ротором этого достигают включением в цепь ротора активных сопротивлений, называемых пусковыми реостатами (рис. 24.1). Пусковой реостат, включаемый только при пуске дви-

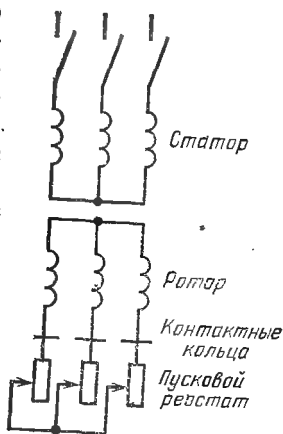


Рис. 24.1. Схема включения пускового реостата в цепь фазной обмотки ротора

гателя, рассчитывают на кратковременный режим работы. В процессе пуска сопротивление пускового реостата изменяется, для чего последний имеет несколько выводов (ступеней). При включении пускового реостата уменьшается ток в роторе и в статоре и увеличивается пусковой момент. Последнее объясняется тем, что при увеличении активного сопротивления обмотки ротора увеличивается в некоторых пределах и активная составляющая тока в этой обмотке. Если активное сопротивление цепи ротора при включении реостата  $r_{п}'$  будет  $r_2' + r_{п}' = X_k = X_1 + X_2'$ , то пусковой момент окажется равным максимальному (рис. 24.2).

Пускают двигатель при полностью введенном сопротивлении пускового реостата в цепи ротора. Если пусковой момент окажется больше тормозного момента на валу двигателя ( $M_{пуск} > M_T$ ), то ротор начнет вращаться.

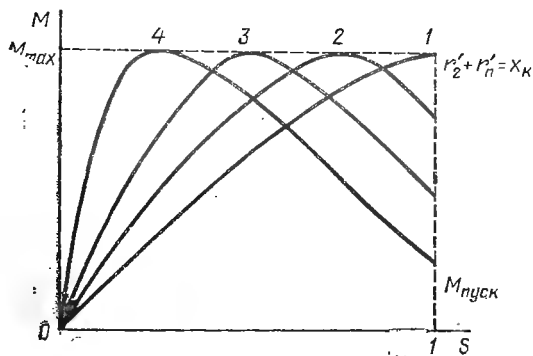


Рис. 24.2. Зависимость вращающего момента от скольжения при различных сопротивлениях в цепи ротора

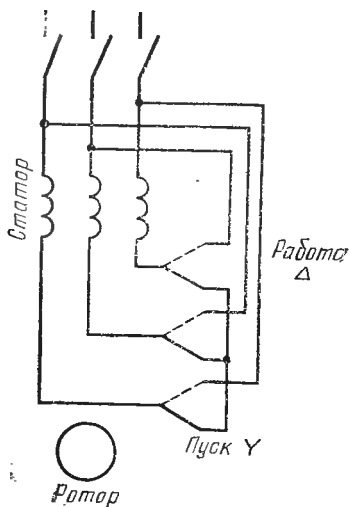


Рис. 24.3. Схема переключения обмотки статора со звезды на треугольник

При работе двигателя контактные кольца соединяются накоротко и в цепи ротора активное сопротивление равно  $r_2'$ . Для устранения износа щеток и потерь энергии на трение щеток о кольца щетки поднимаются (не имеют соприкосновения с кольцами). Это осуществляется специальным рычажным устройством, с помощью которого одновременно с подъемом щеток происходит электрическое соединение контактных колец.

Число ступеней пускового реостата выбирают так, чтобы в процессе пуска при переходе с одной ступени на другую пусковой момент не уменьшался ниже установленного предела, а пусковой ток не превышал определенного значения.

В двигателях с короткозамкнутым ротором включение в цепь ротора пусковых реостатов невозможно. Поэтому эти двигатели в сравнении с фазными не имеют столь хороших пусковых свойств. Здесь уменьшения пускового тока добиваются понижением напряжения сети. Для этого на время пуска двигатель включают в сеть

через понижающие автотрансформаторы или реакторы. Когда ротор приобретает частоту вращения, близкую к номинальной, устройство для понижения напряжения отключают и двигатель включают на полное напряжение сети. Недостаток такого способа пуска — резкое уменьшение пускового момента, пропорционального квадрату напряжения. Для уменьшения пускового тока широко пользуются переключением обмоток статора со звезды на треугольник. Этот способ применяют только тогда, когда при работе двигателя обмотка его статора соединена в треугольник.

Посредством переключателя обмотка статора соединяется при пуске звездой, а в рабочем режиме — треугольником (рис. 24.3). При включении в сеть обмоток статора, соединенных в звезду, фазное напряжение и ток будут в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем при соединении треугольником. Поэтому пусковой ток (линейный) при соединении обмоток звездой окажется в 3 раза меньше, чем при соединении треугольником. Пусковой момент пропорционален квадрату фазного напряжения и при соединении в звезду будет в 3 раза меньше, чем при соединении треугольником.

## § 24.2. Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Простота конструкции и надежность в эксплуатации двигателей с короткозамкнутым ротором — очень существенное достоинство, благодаря которому их широко применяют в промышленности. Однако эти двигатели имеют плохие пусковые характеристики. Значительное улучшение пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором достигается изменением конструкции ротора. Например, широко используют роторы с глубокими пазами и с двойной короткозамкнутой обмоткой, которые впервые были предложены М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Ротор такого двигателя имеет две короткозамкнутые обмотки, выполненные в виде белых клеток (рис. 24.4). Число пазов верхней  $A$  и нижней  $B$  клеток может быть одинаково или различно. Наружная обмотка  $A$  выполнена из стержней малого поперечного сечения, а внутренняя обмотка  $B$  — из стержней большого поперечного сечения. Поэтому активное сопротивление обмотки  $A$  оказывается значительно большим активного сопротивления  $B$  ( $r_A \gg r_B$ ). Благодаря тому, что стержни внутренней обмотки  $B$  глубоко погружены в тело ротора и окружены сталью, индуктивное сопротивление этой обмотки значительно больше индуктивного сопротивления внешней обмотки ( $X_B \gg X_A$ ). Замыкающие кольца на торцовых сторонах ротора выполняют либо общими для двух обмоток, либо обособленными. В двигателях

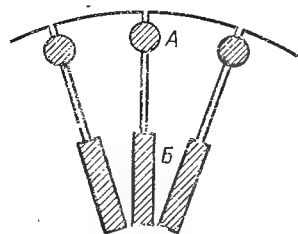


Рис. 24.4. Схема двойной короткозамкнутой обмотки ротора

небольшой мощности обе обмотки выполняются из алюминия, который заливают непосредственно в пазы.

Принцип действия этого двигателя состоит в следующем. В момент включения двигателя в сеть ротор неподвижен и частота тока в роторе равна частоте тока сети:  $f_2 = f_1$ . Ток в обмотках  $A$  и  $B$  распределяется обратно пропорционально их полным сопротивлениям. Так как реактивные сопротивления обмоток асинхронных машин значительно больше активных, то при пуске распределение тока между обмотками  $A$  и  $B$  будет примерно обратно пропорционально

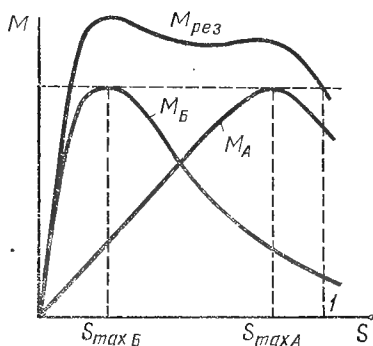


Рис. 24.5. Зависимость вращающего момента от скольжения для двигателя с двойной короткозамкнутой обмоткой

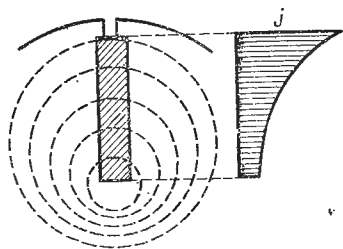


Рис. 24.6. Схема устройства ротора с глубокими пазами

их индуктивным сопротивлениям:  $I_A/I_B = Z_B/Z_A \approx X_B/X_A$ . Поэтому при пуске ток в основном протекает по проводникам внешней обмотки  $A$ , имеющей меньшее индуктивное и большое активное сопротивление. Эту обмотку называют *пусковой*. В рабочем режиме скольжение мало и, следовательно, частота тока в роторе также мала ( $f_2 \approx 0$ ). Поэтому индуктивные сопротивления обмоток не имеют значения и распределение токов в обмотках  $A$  и  $B$  будет обратно пропорционально активным сопротивлениям этих обмоток:  $I_A/I_B = r_B/r_A$ . Таким образом, в рабочем режиме ток в основном протекает по проводникам внутренней обмотки  $B$ , имеющим меньшее активное сопротивление. Эту обмотку называют *рабочей*.

Такая конструкция ротора обеспечивает увеличение активного сопротивления обмотки ротора в момент пуска двигателя, что уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой момент так же, как включение пускового реостата в цепь фазного ротора.

На рис. 24.5 изображена зависимость вращающего момента двигателя с двойной короткозамкнутой обмоткой в роторе от скольжения. Обмотка  $A$  имеет большое активное сопротивление, и максимальный момент, создаваемый током этой обмотки, будет при большем значении скольжения  $s_{\max A}$ . Максимальный момент, создаваемый током обмотки  $B$ , будет при меньшем значении скольжения  $s_{\max B}$ , так как активное сопротивление этой обмотки мало.

Результирующий момент  $M_{\text{рез}}$ , развиваемый двигателем, определяется суммой моментов  $M_A$  и  $M_B$  при любом скольжении.

Пусковые токи в зависимости от величины пускового момента двигателей этих типов имеют следующие значения: при  $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}=1$  имеем  $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}=3,2 \div 3,5$ ; при  $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}=1,5$  имеем  $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}=3,5 \div 3,8$ .

В двигателях с глубокими пазами короткозамкнутую обмотку ротора выполняют в виде тонких и высоких полос (рис. 24.6). При такой конструкции обмотки токи оттесняются к верхней части проводников вследствие того, что нижние части сцеплены с большим числом магнитных линий потока рассеяния. На рисунке справа показано распределение плотности тока по высоте стержня.

Таким образом, ток, протекающий по проводникам, стремится сконцентрироваться преимущественно в верхней части, что равносильно уменьшению поперечного сечения или увеличению активного сопротивления этих проводников. Это явление оттеснения тока в верхние части проводников особенно сильно сказывается в момент включения двигателя в сеть, когда частота тока в роторе равна частоте тока сети и, следовательно, при пуске увеличиваются активное сопротивление обмотки ротора и пусковой момент. При увеличении частоты вращения ротора частота тока в его обмотке уменьшается и ток более равномерно распределяется по сечению стержней и при нормальной частоте вращения неравномерность распределения тока по поперечному сечению стержней почти полностью исчезает. Пусковой момент двигателей этого типа  $M_{\text{п}} = (1 \div 1,5) M_{\text{ном}}$ , а пусковой ток  $I_{\text{п}} = (4 \div 5) I_{\text{ном}}$ .

Таким образом, в двигателях с двойной короткозамкнутой обмоткой и с глубокими пазами пусковые моменты больше, а пусковые токи меньше, чем у обычных короткозамкнутых двигателей. Однако рабочие характеристики этих двигателей несколько хуже, чем у обычных короткозамкнутых двигателей, — меньше  $\cos \varphi$ , к. п. д. и максимальный момент, так как у этих двигателей больше потоки рассеяния, т. е. больше индуктивные сопротивления обмоток ротора.

### § 24.3. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей

Частота вращения ротора  $n_2 = n_1(1-S) = 60f_1(1-S)/p$ . Из выражения видно, что частоту вращения ротора можно регулировать изменением любой из трех величин, определяющих частоту вращения ротора: изменением частоты тока сети  $f_1$ , числа пар полюсов  $p$  и скольжения  $S$ .

Регулирование частоты асинхронных двигателей изменением частоты тока сети сложно, так как для этого необходим какой-либо регулируемый преобразователь частоты или генератор. Этот способ не имеет широкого использования.

Изменение числа полюсов машины возможно либо выполнением на статоре нескольких (обычно двух) обмоток с различ-



ным числом полюсов, либо выполнением одной обмотки, допускающей переключение на различное число полюсов. На статоре может быть помещено две обмотки, каждая из которых допускает переключение на различное число полюсов. Фаза обмотки статора состоит из двух последовательно соединенных катушек  $A_1-X_1$  и  $A_2-X_2$ . При соединении проводника  $A_2$  с проводником  $X_1$  ток при включении обмотки в сеть в какой-либо момент протекает так, как показано на рис. 24.7, а, т. е. на статоре получается четыре полюса ( $2p=4$ ). При переключении второй катушки (рис. 24.7, б) изменяется направление тока в этой катушке и число полюсов ока-

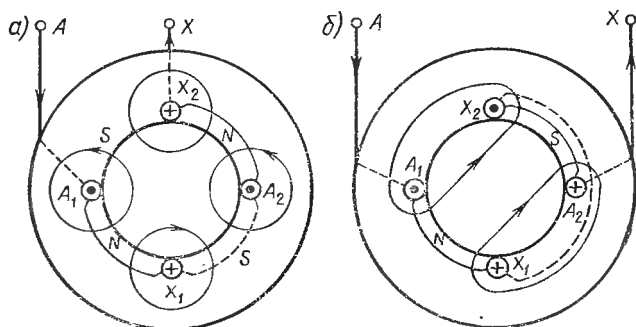


Рис. 24.7. Схема переключения на различное число полюсов одной фазы обмотки статора

жется равным двум ( $2p=2$ ). При изменении числа полюсов статора меняются частоты вращения поля статора и ротора. Заводы СССР выпускают двух-, трех- и четырехскоростные асинхронные двигатели.

Такой способ регулирования частоты вращения является экономичным, но имеет тот недостаток, что регулирование частоты получается ступенчатым и регулирование частоты изменением числа полюсов возможно только для двигателей с короткозамкнутым ротором.

В двигателях с фазным ротором число полюсов статора всегда должно быть равным числу полюсов ротора и при изменении числа полюсов на статоре надо было бы в той же мере изменить число полюсов на роторе, что очень сложно в конструктивном отношении. Более сложное выполнение обмотки статора значительно повышает стоимость и габариты многоскоростных двигателей.

Включение в цепь ротора регулировочного реостата и изменение напряжения сети изменяют скольжение и момент, развиваемый двигателем, который пропорционален квадрату напряжения. Изменение вращающего момента вызовет изменение частоты.

Предположим, что при напряжении сети  $U_1$  рабочий процесс двигателя соответствовал точке А (рис. 24.8, а), в которой развиваемый двигателем момент равен тормозному моменту  $M_T$  на валу. Если уменьшить напряжение сети до величины  $U_1' < U_1$ , то кривая момента пройдет ниже, равновесие моментов нарушится и часто-

та уменьшится, т. е. новый установившийся режим будет в точке  $B$  при большем значении скольжения. Этот способ регулирования экономичен, но не эффективен, так как дает возможность менять частоту лишь в малых пределах до 10—15%. При значительном снижении напряжения вращающий момент резко уменьшается и двигатель не может устойчиво работать.

Регулировочный реостат включают в цепь обмотки фазного ротора подобно пусковому реостату, но в отличие от пускового его рассчитывают на длительное прохождение тока. Положим, что без

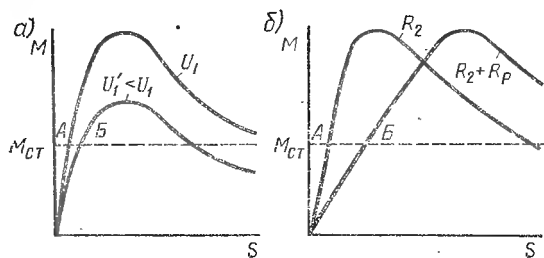


Рис. 24.8. Регулирование частоты вращения изменением скольжения:

$a$  — при изменении напряжения сети;  $b$  — при изменении сопротивления в цепи ротора

регулировочного реостата двигатель работает при частоте, соответствующей точке  $A$  (рис. 24.8, б). При включении регулировочного реостата ток в роторе уменьшится и уменьшит вращающий момент двигателя и частоту вращения или увеличит скольжение. При увеличении скольжения повышаются э. д. с. и ток в роторе. Изменение частоты вращения или скольжения будет происходить до восстановления равновесия моментов, т. е. пока ток в роторе не примет своего начального значения. При увеличении активного сопротивления в роторе максимальный момент, не изменяясь по величине, сместится в область больших скольжений и равновесие моментов, т. е. новый установившийся режим работы машины, будет в точке  $B$ , соответствующей меньшей частоте вращения. Этот способ регулирования частоты вращения может быть использован только в двигателях с фазным ротором и несмотря на то, что он неэкономичен (в регулировочном реостате происходит значительная потеря энергии), имеет широкое применение.

## Глава 25

### ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

#### § 25.1. Рабочий процесс однофазного асинхронного двигателя

Однофазные асинхронные двигатели широко применяют при небольших мощностях (до 1—2 кВт). Такой двигатель отличается от обычного трехфазного тем, что на его статоре помещена одно-

фазная обмотка. Поэтому любой трехфазный асинхронный двигатель может быть использован в качестве однофазного. Ротор однофазного асинхронного двигателя может иметь фазную или короткозамкнутую обмотку. Помещение на роторе однофазной обмотки нежелательно, так как при этом двигатель приобретает свойство одноосного включения, т. е. при определенных условиях может работать с частотой, примерно равной половине синхронной, что значительно меньше номинальной.

Особенность однофазных асинхронных двигателей — отсутствие начального или пускового момента, т. е. при включении такого двигателя в сеть ротор его остается неподвижным. Если же под действием какой-либо внешней силы вывести ротор из состояния покоя, то двигатель будет развивать вращающий момент. Это объясняется тем, что н.с. однофазной обмотки статора будет пульсирующей и создаст пульсирующее магнитное поле. Эта н.с.  $F_c = F_{\max} \times \times \sin \omega t \cos \pi/\tau$  может быть представлена в виде двух вращающихся с одинаковыми частотами в противоположных направлениях н.с., имеющих одинаковые и неизменные амплитуды:

$$F_c = 0,5 F_{\max} [\sin (\omega t + \pi/\tau) + \sin (\omega t - \pi/\tau)],$$

где  $F_{\max}$  — амплитуда н.с. обмотки статора.

Эти н.с. создают вращающиеся магнитные поля: прямое  $\Phi_{\text{пр}}$  и обратное  $\Phi_{\text{обр}}$ , частоты которых определяются частотой тока;  $n_1 = 60 f_1 / p$ . При неподвижном роторе прямое и обратное вращающиеся магнитные поля создают в обмотке ротора одинаковые э. д. с., под действием которых протекают одинаковые токи. Поэтому вращающие моменты, развиваемые взаимодействием вращающихся магнитных полей с токами в роторе, окажутся равными и противоположно направленными, так что результирующий момент равен нулю.

Если с помощью постороннего усилия вращать ротор с некоторой частотой  $n_2$ , то магнитное поле, вращающееся в том же направлении (прямое), будет иметь относительно ротора частоту  $n_{\text{пр}} = n_1 - n_2 = n_1 - n_1(1-S) = S n_1$ , а магнитное поле, вращающееся в противоположном направлении (обратное), — частоту  $n_{\text{обр}} = n_1 + n_2 = n_1 + n_1(1-S) = n_1(2-S)$ .

Эти магнитные поля, пересекая проводники обмотки ротора, создают в этой обмотке э. д. с., под действием которых в ней протекают токи. При этом э. д. с.  $E_{2\text{пр}}$  и токи в роторе  $I_{2\text{пр}}$ , созданные прямым полем, имеют частоту меньше, чем частота тока сети ( $f_{2\text{пр}} = S f_1$ ), а э. д. с.  $E_{2\text{обр}}$  и токи  $I_{2\text{обр}}$  в роторе, созданные обратным полем, — частоту больше, чем частота тока сети [ $f_{2\text{обр}} = (2-S) f_1$ ].

В результате взаимодействия вращающихся прямого и обратного магнитных полей с токами в обмотке ротора создаются противоположно направленные вращающие моменты:

$$M_{\text{пр}} = C \Phi_{\text{пр}} I_{2\text{пр}} \cos \Psi_{2\text{пр}}; \quad M_{\text{обр}} = C \Phi_{\text{обр}} I_{2\text{обр}} \cos \Psi_{2\text{обр}},$$

где  $C$  — коэффициент (см. § 22.2);  $\Psi_{2\text{пр}}$  и  $\Psi_{2\text{обр}}$  — углы сдвига фаз между токами в роторе и э. д. с., вызывающими эти токи.

Результатирующий вращающий момент двигателя определяется разностью моментов, создаваемых прямым и обратным полем:  $M_p = M_{пр} - M_{обр}$ .

При вращении ротора частота тока в роторе, созданного прямым магнитным полем, снижается, что уменьшает угол сдвига фаз  $\Psi_{2пр}$  и увеличивает момент от прямого поля  $M_{пр}$ , тогда как момент, развиваемый обратным полем, уменьшается, так как падает  $\cos \Psi_{2обр}$  за счет повышения частоты тока в роторе  $f_{2обр}$ , созданного обратным полем. Таким образом, при вращении ротора результирующий момент не равен нулю, т. е. двигатель развивает вращающий момент.

Работа однофазного асинхронного двигателя подобна работе двух одинаковых трехфазных двигателей, соединенных валами и создающих противоположно направленные моменты. Вращающий момент, создаваемый прямым полем при изменении скольжения от  $S_{пр} = 0$  ( $n_2 = n_{1пр}$ ) до  $S_{пр} = 2$  ( $n_2 = -n_{1пр} = n_{1обр}$ ), определяется такой же зависимостью, как и в обычном трехфазном двигателе (рис. 25.1). Той же зависимостью представится момент, развиваемый обратным полем. Моменты  $M_{пр}$  и  $M_{обр}$  на графике отложены по обе стороны от горизонтальной оси, так как они направлены встречно. При неподвижном роторе  $S_{пр} = S_{обр} = 1$  и  $M_{пр} = M_{обр}$ , т. е.  $M_p = 0$ . При вращении ротора момент, создаваемый прямым полем, увеличивается, а момент, создаваемый обратным полем, уменьшается, так что  $M_p \neq 0$ . При этом однофазный двигатель развивает одинаковый вращающий момент при вращении как в одном, так и в другом направлении, т. е. направление вращения ротора такого двигателя зависит только от направления действия силы, выводящей двигатель из неподвижного состояния.

При работе трехфазного асинхронного двигателя вращающееся магнитное поле имеет постоянную амплитуду. В однофазном двигателе амплитуда вращающегося поля не остается постоянной, а изменяется от некоторой наименьшей величины до определенного наибольшего значения, причем эти значения амплитуды вращающегося поля не остаются постоянными с изменением нагрузки двигателя.

При х.х. однофазного асинхронного двигателя наименьшие и наибольшие значения амплитуды вращающегося поля будут примерно одинаковыми, т. е. создается примерно круговое поле. При повышении нагрузки увеличивается разница между наибольшим и наименьшим значениями амплитуды вращающегося поля и ре-

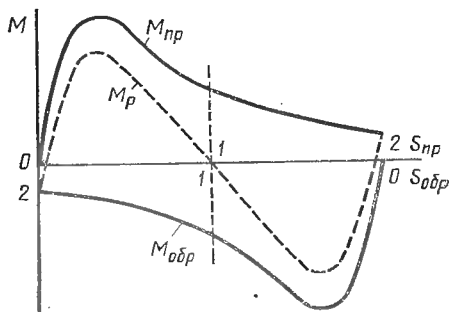


Рис. 25.1. Зависимость вращающего момента от скольжения для однофазного асинхронного двигателя

зультатируется тем, что при нагрузке машины амплитуды прямого и обратного вращающихся полей окажутся различными. Ток в роторе, созданный обратным полем, имеет большую частоту, и, сле-

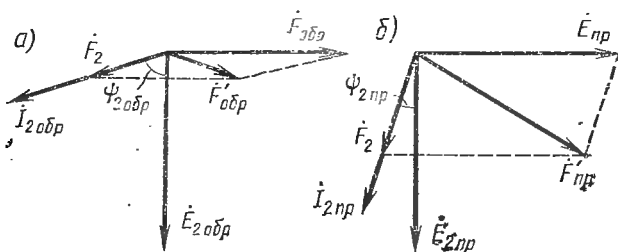


Рис. 25.2. Векторные диаграммы н. с. обратного (а) и прямого (б) поля

довательно, этот ток окажется сдвинутым относительно вектора э. д. с. на угол  $\approx \pi/2$  в сторону отставания, т. е. окажется направленным встречно н.с. обратного поля  $F_{обр}$  (рис. 25.2, а).

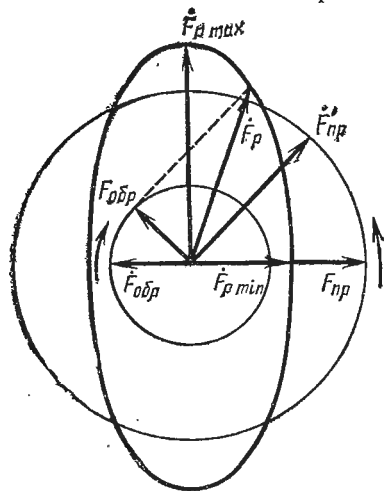


Рис. 25.3. Векторная диаграмма н. с. однофазного двигателя при нагрузке

$\dot{F}_p = \dot{F}'_{пр} + \dot{F}'_{обр}$ . Эта н. с. вращается в пространстве с переменной амплитудой, меняющейся от наибольшего значения  $F_{p\max} = F'_{пр} + F'_{обр}$  до наименьшего значения  $F_{p\min} = F'_{пр} - F'_{обр}$ .

## § 25.2. Пуск однофазных асинхронных двигателей

Отсутствие начального момента — существенный недостаток однофазных асинхронных двигателей. Поэтому эти двигатели всег-

За счет размагничивающего действия тока обмотки ротора н. с. обратного поля уменьшится до величины  $F'_{обр}$ . Ток в обмотке ротора, созданный прямым полем, имеет малую частоту, следовательно, вектор этого тока сдвинут относительно вектора э. д. с. обмотки ротора  $E_{2пр}$  на малый угол  $\psi_{2пр}$  (рис. 25.2, б) и уменьшения н. с. прямого поля происходить не будет.

При нагрузке машины прямое и обратное магнитные поля вращаются с одинаковыми частотами в противоположных направлениях, но амплитуды н. с. их не одинаковы (рис. 25.3).

Н. с. результирующего поля в любой момент определится геометрической суммой этих н. с.:

да снабжают пусковым устройством. Наиболее простое пусковое устройство — две обмотки, помещенные на статоре и сдвинутые друг относительно друга на половину полюсного деления (90 эл. град.). Эти катушки питаются от симметричной двухфазной сети, т. е. напряжения, приложенные к катушкам, равны между собой и сдвинуты на четверть периода по фазе  $\vec{U}_2 = \pm j\vec{U}_1$ . В этом случае токи, протекающие по катушкам, окажутся также сдвинутыми по фазе на четверть периода, что в дополнение к пространственному сдвигу катушек дает возможность получить вращающееся магнитное поле. При наличии вращающегося магнитного поля двигатель развивает пусковой момент.

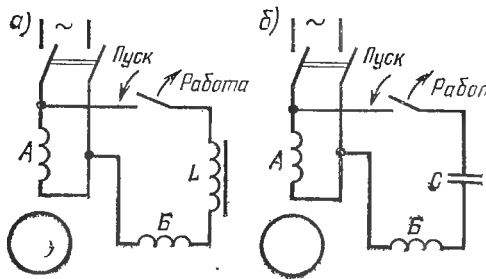


Рис. 25.4. Схема включения пусковой обмотки однофазного двигателя через индуктивную катушку (а) и конденсатор (б)

В случае, когда двухфазная сеть отсутствует, однофазный двигатель пускают включением двух катушек в одну общую однофазную сеть. Для получения угла сдвига фаз между токами в катуш-

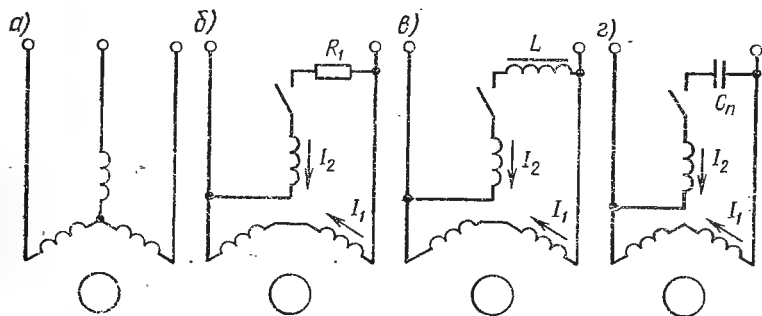


Рис. 25.5. Схема включения трехфазного двигателя (а) в однофазную сеть с пусковым активным (б), индуктивным (в) и емкостным (г) сопротивлениями

ках, примерно равного  $\pm\pi/2$ , одну из катушек (рабочую) включают в сеть непосредственно или с пусковым активным сопротивлением, а вторую катушку (пусковую) — через индуктивную катушку (а) или конденсатор (б) (рис. 25.4). Пусковая обмотка включается только на период пуска. В момент, когда ротор приобретает определенную частоту вращения, пусковая обмотка отключается от сети и двигатель работает как однофазный. Отключается пусковая обмотка центробежным выключателем или специальным реле.

В качестве однофазного двигателя может быть использован любой трехфазный асинхронный двигатель (рис. 25.5, а), тогда его

рабочая или главная обмотка, состоящая из двух последовательно соединенных фаз трехфазного двигателя, включается непосредственно в однофазную сеть, третья фаза, являющаяся пусковой или вспомогательной обмоткой, включается в ту же сеть через пусковой элемент — сопротивление (рис. 25.5, б), индуктивность (рис. 25.5, в) или конденсатор (рис. 25.5, г).

При пуске трехфазного двигателя, используемого в качестве однофазного, в рабочей и пусковой обмотках протекают токи  $I_1$  и  $I_2$ , сдвинутые по фазе относительно приложенного напряжения соответственно на углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Считая токи в обмотках синусоидальными, выражениям для этих токов можно придать следующий вид:  $i_1 = I_{\max} \sin \omega t$  и  $i_2 = I'_{\max} \sin (\omega t + \varphi)$ , где  $I_{\max}$  и  $I'_{\max}$  — амплитуды токов в рабочей и пусковой обмотках;  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  — разность углов сдвига фаз между напряжением сети и токами в рабочей и пусковой обмотках.

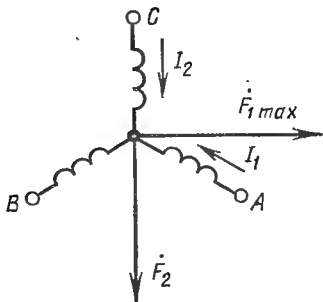


Рис. 25.6. Векторная диаграмма намагничивающих сил трехфазного двигателя, включенного в однофазную сеть

Н. с. рабочей обмотки определится геометрической разностью н. с. двух фаз, образующих рабочую обмотку:  $F_1 = F_A - F_B$ .

Таким образом, вектор амплитуды н. с. рабочей обмотки  $F_{1\max}$  совпадает с горизонтальной осью (рис. 25.6) и смещен относительно осей катушек фаз  $A$  и  $B$  на  $\pm 30^\circ$ . Следовательно, амплитуда н. с. рабочей обмотки  $F_{1\max} = \sqrt{3} F_{\max}$ , где  $F_{\max}$  — амплитуда н. с. одной фазы.

Совместив начало пространственной координаты  $x$  воздушного промежутка с осью рабочей обмотки и ограничиваясь первой пространственной гармонической, н. с. рабочей обмотки определим следующим выражением:

$$F_1 = \sqrt{3} F_{\max} \sin \omega t \cos (x\pi/\tau) = (\sqrt{3}/2) F_{\max} [\sin (\omega t + x\pi/\tau) + \sin (\omega t - x\pi/\tau)].$$

Н. с. пусковой обмотки сдвинута относительно н. с. рабочей обмотки на угол  $\pi/2$  в пространстве и для первой гармоники пространственного распределения определится следующим выражением:

$$F_2 = \pm F'_{\max} \sin (\omega t + \varphi) \cos (x\pi/\tau + \pi/2) = 0,5 F'_{\max} [\sin (\omega t + x\pi/\tau + \varphi + \pi/2) + \sin (\omega t - x\pi/\tau + \varphi - \pi/2)].$$

Результирующая н. с., равная в любой точке координаты  $x$  и в любой момент сумме н. с. рабочей и пусковой обмоток, будет вращающейся и круговой в том случае, когда  $F'_{\max} = \sqrt{3} F_{\max}$ , т. е. в пусковой обмотке протекает ток в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем в рабочей

и  $\varphi = \pm \pi/2$ . Если эти условия выполнены, то н. с. пусковой обмотки.  $F_2 = \pm (\sqrt{3}/2) F_{\max} [\sin(\omega t + x\pi/\tau + \pi) + \sin(\omega t - x\pi/\tau)]$ , а результирующая н. с.  $F_p = (\sqrt{3}/2) F_{\max} [\sin(\omega t + x\pi/\tau) \pm \sin(\omega t + x\pi/\tau) + \sin(\omega t - x\pi/\tau) \pm \sin(\omega t - x\pi/\tau)]$ , т. е. равна либо  $F_p = \sqrt{3} F_{\max} \sin(\omega t + x\pi/\tau)$ , либо  $F_p = \sqrt{3} F_{\max} \sin(\omega t - x\pi/\tau)$ . Если условия  $F'_{\max} = \sqrt{3} F_{\max}$  и  $\varphi = \pm \pi/2$  не выполнены, то вращающееся поле окажется эллиптическим.

При неравных амплитудах н. с. рабочей и пусковой обмоток получим

$$F_1 = (\sqrt{3}/2) F_{\max} [\sin(\omega t + x\pi/\tau) + \sin(\omega t - x\pi/\tau)];$$

$$F_2 = 0,5 F_{\max} [\sin(\omega t + x\pi/\tau + \varphi + \pi/2) + \sin(\omega t - x\pi/\tau + \varphi - \pi/2)].$$

Результирующая н. с.  $F_p = (\sqrt{3}/2) F_{\max} \sin(\omega t + x\pi/\tau) + 0,5 F'_{\max} \sin(\omega t + x\pi/\tau + \varphi + \pi/2) + (\sqrt{3}/2) F_{\max} \sin(\omega t - x\pi/\tau) + 0,5 F'_{\max} \sin(\omega t - x\pi/\tau + \varphi - \pi/2)$ . Это выражение показывает, что при неравенстве амплитуд н. с. рабочей и пусковой обмоток будут созданы прямые и обратные вращающиеся поля.

Если разность фазных углов токов обмоток  $\varphi = \pi/2$ , то результирующая н. с.

$$F_p = [(\sqrt{3}/2) F_{\max} - 0,5 F'_{\max}] \sin(\omega t + x\pi/\tau) + [(\sqrt{3}/2) F_{\max} + 0,5 F'_{\max}] \sin(\omega t - x\pi/\tau);$$

при  $\varphi = -\pi/2$

$$F_p = [(\sqrt{3}/2) F_{\max} + 0,5 F'_{\max}] \sin(\omega t + x\pi/\tau) + [(\sqrt{3}/2) F_{\max} - 0,5 F'_{\max}] \sin(\omega t - x\pi/\tau);$$

при  $\varphi = 0$

$$F_p = (\sqrt{3}/2) F_{\max} \sin(\omega t + x\pi/\tau) + 0,5 F'_{\max} \sin(\omega t + x\pi/\tau + \pi/2) + (\sqrt{3}/2) F_{\max} \sin(\omega t - x\pi/\tau) + 0,5 F'_{\max} \sin(\omega t - x\pi/\tau - \pi/2),$$

т. е. прямая и обратная н. с. одинаковы и создается пульсирующее магнитное поле. Поэтому включение индуктивности в цепь пусковой обмотки не может обеспечить создание значительного пускового момента. При включении рабочей обмотки непосредственно в сеть ток в ней окажется отстающим от приложенного напряжения на большой угол  $\varphi_1 \approx +\pi/2$ . При включении индуктивности в цепь пусковой обмотки разность углов  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \approx 0$  окажется малой и вращающегося поля нет. Поэтому при использовании трехфазного двигателя в качестве однофазного пусковую обмотку включа-



ют в сеть либо через активное сопротивление, либо через конденсатор.

Если двигатель пускают при большом активном сопротивлении, например при введенном пусковом реостате в цепи обмотки фазного ротора, то включение в цепь пусковой обмотки активного сопротивления не создает начального момента, так как в этом случае токи в рабочей и пусковой обмотках будут близки к активным и разность углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  мала, т. е.  $\varphi \approx 0$ .

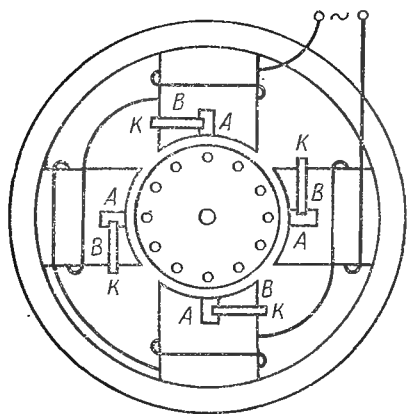


Рис. 25.7. Схема короткозамкнутых пусковых обмоток однофазного асинхронного двигателя

В однофазных двигателях малой мощности в качестве пусковой обмотки используют короткозамкнутые витки, уложенные на полюсах статора. Статоры таких двигателей выполняют с явно выраженными полюсами (рис. 25.7), а рабочую обмотку укладывают на полюсы в виде катушек подобно обмотке возбуждения машины постоянного тока. Каждый полюс разделен на две части, на одной из которых помещают короткозамкнутые катушки. В этих катушках создаются токи, препятствующие прохождению магнитного потока в части полюса B, вследствие чего магнитный поток в части полюса A достигает максимального значения раньше, чем в части полюса B. Эти два несо-

падающих по фазе потока создают вращающееся магнитное поле. В короткозамкнутых катушках создаются добавочные потери, что снижает к. п. д. двигателя. Поэтому такой способ пуска имеет использование только в двигателях очень малых мощностей (до 100 Вт), где вопрос о к. п. д. не является первостепенным.

### § 25.3. Конденсаторные двигатели

Конденсаторный двигатель представляет собой однофазный асинхронный двигатель с двумя обмотками на статоре и короткозамкнутым ротором (рис. 25.8). В отличие от конденсаторного способа пуска однофазных двигателей, рассмотренного выше, в конденсаторных (двухфазных) двигателях вспомогательная обмотка рассчитана на длительное прохождение тока и остается включенной не только при пуске двигателя, но и при работе. Наличие вращающегося поля при работе двигателя улучшает рабочие свойства этого двигателя в сравнении с однофазными.

Круговое вращающееся магнитное поле в конденсаторном двигателе будет получено в случае равенства н. с. двух катушек, при-

чем н. с. катушки  $b$  должна опережать н. с. катушки  $a$  на  $\pi/2$  во времени, т. е.  $\vec{F}_b = +j\vec{F}_a$  или  $\vec{I}_b k_b \omega_b = +j\vec{I}_a k_a \omega_a$ , где  $I_a$  и  $I_b$  — токи в обмотках  $a$  и  $b$ ;  $k_a$  и  $k_b$  — обмоточные коэффициенты;  $\omega_a$  и  $\omega_b$  — числа витков этих обмоток.

Так как отношение произведений обмоточных коэффициентов на число витков двух катушек представляет собой коэффициент трансформации  $k = k_a \omega_a / (k_b \omega_b)$ , то этому выражению можем придать следующий вид:  $\vec{I}_b / k = +j\vec{I}_a$  или  $\vec{I}_b' = +j\vec{I}_a$ .

Предполагая равенство приведенных активных и реактивных сопротивлений катушек  $a$  и  $b$  ( $r_b' = r_a$  и  $x_b' = x_a$  или  $\varphi_b = \varphi_a$ , что

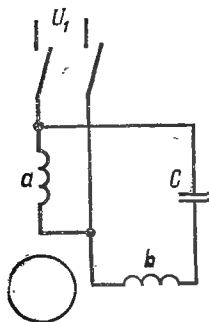


Рис. 25.8. Схема конденсаторного двигателя

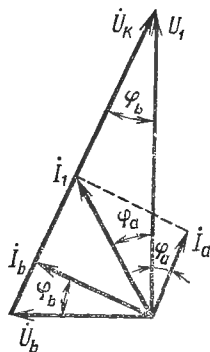


Рис. 25.9. Векторная диаграмма конденсаторного двигателя

будет иметь место при одинаковых плотностях тока в катушках), условие получения кругового вращающегося магнитного поля можно определить следующим выражением:  $k\vec{U}_b = +j\vec{U}_1$  или  $\vec{U}_b' = +j\vec{U}_1$ . На векторной диаграмме (рис. 25.9) углы между векторами токов и напряжений в катушках  $a$  и  $b$  равны  $\pi/2$ .

Последовательно с катушкой  $b$  включен конденсатор (рис. 25.8), падение напряжения на котором равно  $U_k$ , причем геометрическая сумма напряжений на конденсаторе и обмотке  $b$  равна напряжению сети:  $\vec{U}_b + \vec{U}_k = \vec{U}_1$ . Если пренебречь диэлектрическими потерями в конденсаторе, то вектор  $\vec{U}_k = -j\vec{I}_b x_c$  окажется перпендикулярным вектору тока  $I_b$ , протекающего через конденсатор и катушку  $b$ . Результирующий ток  $I_1$ , потребляемый двигателем из сети, окажется опережающим, что всегда будет иметь место при  $k < 1$  и  $\varphi_a = \varphi_b < \pi/4$ . При  $k = 1$  и  $\varphi_a = \varphi_b = \pi/4$  имеем  $\cos \varphi_1 = 1$ , т. е. ток, потребляемый двигателем, окажется чисто активным. В случае, когда  $k > 1$  и  $\varphi_a = \varphi_b > \pi/4$ , ток  $I_1$  отстает так же, как и в обычном асинхронном двигателе. Из векторной диаграммы соотношение чисел витков обмоток для создания кругового вращающегося поля определяется отношением активного сопротивления к реактивному любой из обмоток:

$$k = U_a / U_b = \operatorname{ctg} \varphi_b = \operatorname{ctg} \varphi_a = r_b / X_b = r_a / X_a.$$

Ток в обмотке  $b$  будет  $I_b = \dot{U}_1 / [r_b + j(X_b - X_c)]$ , или  $I_b = \dot{U}_b / (r_b + jX_b) = +j\dot{U}_1 / [k(r_b + jX_b)]$ .

Приравняв правые части этих равенств, получим  $j r_b - (X_b - X_c) = k(r_b + jX_b)$ , откуда

$$X_c = \sqrt{(k r_b + X_b)^2 + (k X_b + r_b)^2} = \sqrt{(k^2 + 1)(r_b^2 + X_b^2)}.$$

Так как  $k = r_b / X_b$ , то имеем  $X_c = (r_b^2 + X_b^2) / X_b = Z_b^2 / X_b = Z_b / \sin \varphi_b = U_b / I_b \sin \varphi_b$  и емкость конденсатора, необходимая для создания кругового вращающегося поля,

$$C = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{I_b \sin \varphi_b}{U_b} = \frac{U_b I_b \cos \varphi_b \operatorname{tg} \varphi_b}{\omega U_b^2}.$$

Имея в виду равенство мощностей, потребляемых обмотками  $a$  и  $b$  из сети, найдем

$$P_1 = 2 U_b I_b \cos \varphi_b \text{ и } C = P_1 \operatorname{tg} \varphi_b / (2 \omega U_b^2),$$

где  $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$  — активная мощность, потребляемая двигателем из сети.

Следует помнить, что круговое вращающееся магнитное поле будет получено только при определенной нагрузке. При изменении нагрузки токи в обмотках  $a$  и  $b$  меняются неравномерно за счет наличия емкости в цепи обмотки  $b$ , в значительной степени изменяется угол  $\varphi_1$  и не будет иметь место условие получения кругового вращающегося поля ( $\dot{F}_b \neq +j\dot{F}_a$ ), т. е. поле окажется эллиптическим. В нем помимо кругового поля появляется обратное вращающееся, создающее тормозной момент, который уменьшает вращающий момент машины.

При увеличении емкости конденсатора увеличится ток, а следовательно, и нагрузка двигателя, создающая круговое вращающееся поле. Поэтому увеличение емкости конденсаторной батареи вызывает повышение максимального момента машины и смещение его в область больших нагрузок, т. е. больших скольжений (рис. 25.10).

С увеличением емкости растет также и пусковой момент двигателя. Однако увеличение емкости батареи конденсаторов в рабочем режиме нежелательно, так как это ведет к снижению частоты вращения и понижает к. п. д. двигателя. Поэтому конденсаторные двигатели выполняют с двумя батареями конденсаторов — с постоянно включенной или рабочей емкостью  $C_{\text{раб}}$  и пусковой емкостью  $C_{\text{пус}}$ , включаемой только на период пуска двигателя (рис. 25.11).

В конденсаторных двигателях возможно регулирование частоты вращения при высоком к. п. д. Часто регулирование производят изменением величины напряжения, приложенного к одной из обмоток, или за счет изменения угла сдвига фаз  $\varphi$  между напряжениями, приложенными к обмоткам  $a$  и  $b$ .

В некоторых случаях частоту регулируют одновременным изменением величины приложенного к одной из двух обмоток напряжения и угла сдвига  $\varphi$ . Уменьшение напряжения  $U_b$  или угла  $\varphi$  понижает амплитуду н.с. прямого поля и увеличивает амплитуду н.с. обратного поля, т. е. вращающий момент двигателя уменьшается, что снижает частоту вращения.

В общем случае при изменении напряжения  $U_b$  и угла  $\varphi$  н.с. обмоток  $a$  и  $b$  будут

$$F_a = 0,5 F_{\max a} [\sin(\omega t + x\pi/\tau) + \sin(\omega t - x\pi/\tau)];$$

$$F_b = 0,5 F_{\max b} [\sin(\omega t + x\pi/\tau - \pi/2 - \varphi) + \sin(\omega t - x\pi/\tau + \pi/2 - \varphi)].$$

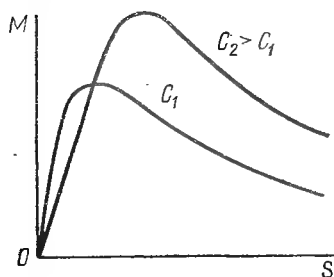


Рис. 25.10. Зависимость вращающего момента от скольжения конденсаторного двигателя при различных емкостях конденсатора

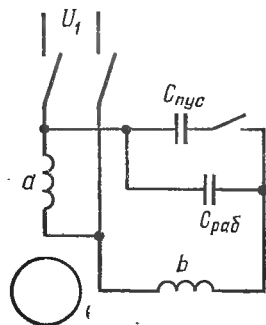


Рис. 25.11. Схема конденсаторного двигателя с двумя батареями конденсаторов — пусковой и рабочей

Результирующая н.с. прямого и обратного вращающихся полей

$$F_{\text{пр}} = F_{\max \text{ пр}} \sin(\omega t - x\pi/\tau) \text{ и } F_{\text{обр}} = F_{\max \text{ обр}} \sin(\omega t + x\pi/\tau),$$

$$\text{где } F_{\max \text{ пр}} = 0,5 \sqrt{F_{\max a}^2 + F_{\max b}^2 + 2F_{\max a}F_{\max b} \sin \varphi}$$

$$\text{и } F_{\max \text{ обр}} = 0,5 \sqrt{F_{\max a}^2 + F_{\max b}^2 - 2F_{\max a}F_{\max b} \sin \varphi}$$

— амплитуды н.с. прямого и обратного вращающихся полей.

Пренебрегая насыщением стали и полагая постоянными сопротивления обмоток, считаем н.с. обмоток  $a$  и  $b$  пропорциональными напряжениям:  $F_{\max a} \propto U_a$  и  $F_{\max b} \propto U_b$ .

При уменьшении напряжения одной из обмоток, например обмотки  $b$ , до  $\varphi = 0$  амплитуды н.с. прямого и обратного полей равны между собой, т. е. получаем пульсирующее магнитное поле. При равенстве н.с. обмоток  $a$  и  $b$   $F_{\max a} = F_{\max b}$  и при  $\varphi = \pi/2$  получаем круговое вращающееся магнитное поле ( $F_{\text{обр}} = 0$ ).

## § 26.1. Исполнительный асинхронный двигатель с полым ротором

Асинхронный двигатель с полым ротором получил широкое распространение в качестве исполнительного органа для отработки той или иной величины в технике следящих систем, в радиоустройствах для автоматической подстройки и перестройке, в различных регуляторах и др. Этот двигатель является двухфазным с короткозамкнутым ротором, который выполняют в виде полого алюминиевого цилиндра.

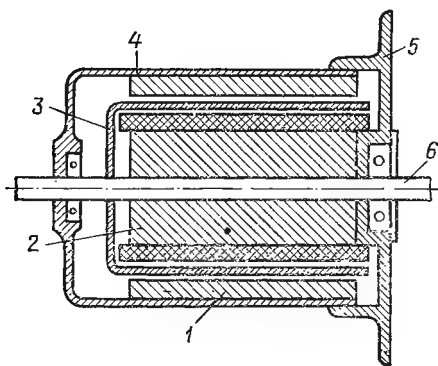


Рис. 26.1. Схема устройства двигателя с полым ротором

Принципиальная схема устройства двигателя показана на рис. 26.1. Двигатель состоит из внешнего статора 1, внутреннего статора с двухфазной обмоткой 2, ротора в виде полого цилиндра 3, корпуса 4 и фланца 5. В некоторых случаях обмотки помещают на внешнем статоре, а внутренний служит лишь для уменьшения магнитного сопротивления. Полый ротор укреплен на валу двигателя 6 и вращается в воздушном зазоре между внешним и внутренним статорами. На внутреннем (или внешнем) статоре помещены две обмотки — возбуждения и управления. Эти обмотки сдвинуты в пространстве на 90 эл. град и выполнены либо в виде двух отдельных обмоток (рис. 26.2, а), либо в виде распределенной замкнутой, разделенной отводами на четыре части (рис. 26.2, б). В распределенной замкнутой обмотке лучше используются материалы в тепловом отношении за счет равномерного распределения токов, но существует электрическая связь между цепями управления и возбуждения и при большом числе полюсов будет большим число параллельных ветвей.

Обмотку возбуждения подключают к сети, а управляющая получает питание от усилителя системы управления. Фазный сдвиг токов в обмотках возбуждения и управления осуществляется либо конденсатором, либо усилителем, что предусматривается его схемой. Двигатели с полым ротором строят на мощности от десятых долей до нескольких сотен ватт как для стандартной (50 Гц), так и для повышенных частот (400—500 Гц) с синхронной частотой вращения 1570 рад/с (30 000 об/мин).

Характерная особенность двигателя с полым ротором — большое активное сопротивление ротора по сравнению с другими сопро-

тивлениями. Поэтому в пределах изменения от 0 до 2 при отсутствии тока в обмотке управления зависимость момента можно принять линейной (рис. 26.3). Момент, развиваемый прямым полем, представлен прямой 1, момент от обратного поля — 2, результирующий момент — 3. При наличии тока в обмотке управ-

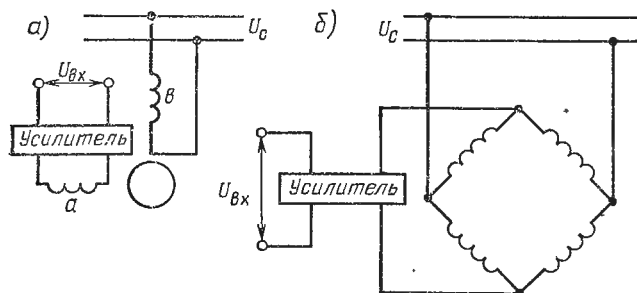


Рис. 26.2. Схема включения обмоток двигателя с полым ротором при раздельных обмотках (а) и при одной распределенной (б)

ления ( $i_y \neq 0$ ) магнитное поле будет вращающимся (эллиптическим). Амплитуда прямого поля равна сумме амплитуд пульсирующих полей обмоток возбуждения и управления, а амплитуда обратного поля — разности амплитуд пульсирующих полей этих обмоток. Так как электромагнитный момент пропорционален квадрату напряжения (квадрату магнитного потока), то при  $i_y \neq 0$  момент от прямого поля увеличивается (прямая 4), а момент от обратного поля уменьшается (прямая 5) и зависимость результирующего момента также изменится (прямая 6).

Широкое использование двигателей с полым ротором обусловлено рядом преимуществ, выгодно отличающих их от исполнительных двигателей других типов:

- 1) прямолинейность механической характеристики;
- 2) малый момент инерции, которого достигают выполнением ротора в виде полого цилиндра (толщина стенки 0,2—0,8 мм) из немагнитного материала с малым удельным весом (алюминий или дюралюминий);
- 3) большой пусковой момент, которого достигают выполнением ротора с большим активным сопротивлением;

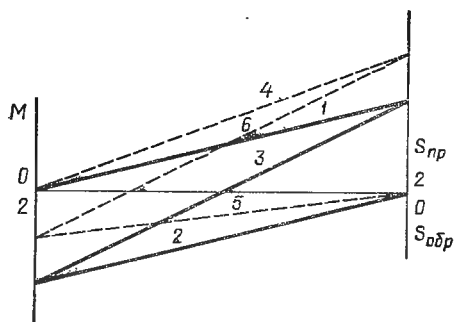


Рис. 26.3. Зависимость вращающего момента от скольжения двигателя с полым ротором

4) возможность плавного регулирования частоты вращения в широких пределах;

5) отсутствие зубцов, обеспечивающее плавный и бесшумный ход двигателя;

6) быстрое реверсирование;

7) самоторможение двигателя при снятии напряжения с обмотки управления, так как благодаря большому активному сопротивлению ротора тормозной момент больше вращающего;

8) отсутствие трущихся контактов, что обеспечивает малый момент трения и отсутствие искрения и связанных с ним радиопомех.

Наряду с положительными свойствами эти двигатели обладают рядом недостатков:

1) большие немагнитные зазоры, вызывающие значительное увеличение н.с. и габаритов двигателей и понижение коэффициента мощности;

2) низкий к. п. д., так как нормальная работа двигателя происходит при больших скольжениях (примерно 50%), что вызывается повышенным активным сопротивлением ротора.

## § 26.2. Гистерезисный двигатель

В гистерезисных двигателях вращающий момент создается вследствие явления гистерезиса. По устройству гистерезисные двигатели подобны асинхронным. На статоре располагают трехфазную

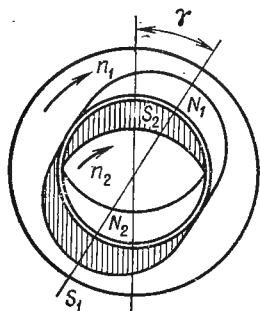


Рис. 26.4. Схема устройства гистерезисного двигателя

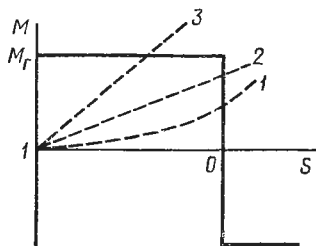


Рис. 26.5. Механическая характеристика гистерезисного двигателя

или двухфазную обмотку, токи которой возбуждают вращающееся магнитное поле. Ротор изготавливают в виде гладкого стального цилиндра без пазов и выступов. Для уменьшения потерь на вихревые токи ротор собирают из пластин, изолированных друг от друга. Магнитный материал ротора должен обладать большой коэрцитивной силой и широкой петлей гистерезиса.

Вследствие гистерезиса ротор намагничивается вращающимся полем статора с некоторым отставанием во времени. Если условно изобразить (рис. 26.4) вращающееся поле статора в виде полюсов магнита  $N_1$  и  $S_1$ , то полюсы ротора  $N_2$  и  $S_2$  будут сдвинуты в прост-

ранство относительно полюсов статора на угол, соответствующий гистерезисному временному углу  $\gamma$ . В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора создается вращающий момент  $M_r$ , зависящий от гистерезисного угла  $\gamma$ , т. е. от гистерезисных свойств стали. Под действием развиваемого момента  $M_r$  ротор двигателя приходит во вращение с частотой  $n_2$ , не равной частоте вращения магнитного поля  $n_1$ .

Электромагнитная мощность двигателя, передаваемая со статора на ротор,

$$P_{\text{эм}} = M_r \Omega_1 = M_r 2\pi n_1 / 60,$$

где  $\Omega_1$  и  $n_1$  — угловая частота и частота вращения поля статора соответственно.

Эта мощность преобразуется в механическую  $P_M = M_r \Omega_2 = M_r 2\pi n_2 / 60$  и расходуется на потери от гистерезиса  $P_r = P_{\text{эм}} - P_M = M_r (\Omega_1 - \Omega_2) = P_{\text{эм}} S$  (потери от вихревых токов можно пренебречь), где  $\Omega_2$  и  $n_2$  — угловая частота и частота вращения ротора соответственно.

Вращающий момент, развиваемый гистерезисным двигателем,

$$M_r = P_{\text{эм}} / \Omega_1 = P_r / (S 2\pi f_1 / p) = p P_r / (2\pi f_2),$$

где  $S f_1 = f_2$ .

Потери на гистерезис могут быть определены выражением

$$P_r = \sigma_r f_2 B^2 G_c,$$

где  $\sigma_r$  — коэффициент удельных потерь, зависящий от марки стали;  $f_2$  — частота перемагничивания ротора;  $B$  — амплитуда магнитной индукции;  $G_c$  — масса активной части ротора.

Таким образом, вращающий момент

$$M_r = p \sigma_r B^2 G_c / (2\pi).$$

Следовательно, вращающий момент гистерезисного двигателя не зависит от частоты перемагничивания и от частоты вращения ротора, т. е. при изменении скольжения от 1 до 0 вращающий момент остается неизменным (рис. 26.5). Если вращать ротор каким-либо двигателем с частотой, большей синхронной, то угол между магнитными полями статора и ротора изменит знак, т. е. момент будет тормозным, и машина будет работать в режиме гистерезисного генератора. Если зависимость тормозного момента  $M_r$  нагрузки от частоты вращения имеет вид кривых 1 или 2, т. е. при изменении скольжения от 1 до 0 момент  $M_r > M_t$ , то двигатель будет устойчиво работать при синхронной скорости. Если же тормозной момент изменяется по кривой 3, то устойчивая работа наступит при скольжении и машина будет работать с асинхронной скоростью, что неэкономично.

Таким образом, в процессе пуска гистерезисный двигатель работает подобно асинхронному, ускоряясь под действием динамического момента, равного разности гистерезисного и тормозного. В установившемся режиме гистерезисный двигатель работает как



синхронный. Так как при синхронной частоте ротора потери на гистерезис в нем отсутствуют, то вся электромагнитная мощность машины преобразуется в механическую.

Достоинство гистерезисных двигателей — надежность в эксплуатации, простота устройства и пуска, неизменность тока при пуске и работе, плавность вхождения в синхронизм. Недостаток — относительно высокая стоимость и большие габариты.

### § 26.3. Однофазный индукционный регулятор и поворотный трансформатор

Индукционный регулятор можно выполнить однофазным. Тогда на статоре и роторе имеются однофазные обмотки (рис. 26.6): одна, например статорная, включается в сеть источника энергии

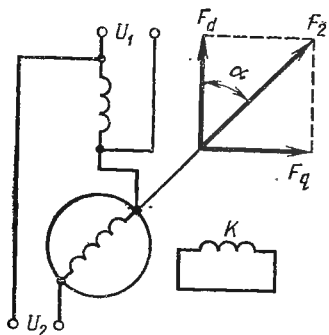


Рис. 26.6. Схема однофазного индукционного регулятора

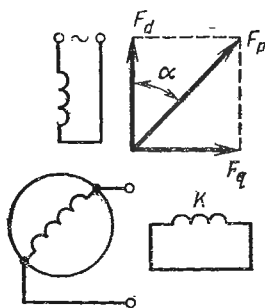


Рис. 26.7. Схема поворотного трансформатора

с напряжением  $U_1$ , вторая (обмотка ротора) соединяется с первой по автотрансформаторной схеме. Так как однофазная обмотка статора создает пульсирующее магнитное поле, то при повороте ротора изменяется магнитный поток, сцепленный с витками обмотки ротора, т. е.

$$\Phi_2 = \Phi_1 \cos \alpha,$$

где  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  — магнитные потоки, созданные обмоткой статора и сцепленные с обмоткой ротора соответственно;  $\alpha$  — угол поворота ротора.

Следовательно, э. д. с., созданная в обмотке ротора,  $E_2 = E_{2\max} \cos \alpha$ , где  $E_{2\max}$  — максимальная э. д. с. обмотки ротора, получающаяся при совпадении осей катушек ротора и статора ( $\alpha = 0$  или  $180^\circ$ ). На выходе регулятора напряжение  $U_2 = U_1 + E_2$  не меняется по фазе, т. е. при  $\alpha = 0$  имеем  $U_2 = U_1 + E_{2\max}$ ; при  $\alpha = \pm 90^\circ$  имеем  $U_2 = U_1$ .

При нагрузке в обмотке ротора протекает ток, создающий свое магнитное поле  $F_2$ . Н. с. ротора может быть представлена в виде:

двух составляющих — продольной  $F_d = F_2 \cos \alpha$  и поперечной  $F_q = F_2 \sin \alpha$ .

Продольная составляющая н.с. ротора  $F_d$  взаимодействует с н.с. статора, как и в трансформаторе, так что в результате взаимодействия н.с. статора  $F_1$  и продольной н.с. ротора устанавливается всегда практически неизменный магнитный поток из условия  $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ . Поперечная составляющая н.с. ротора не компенсирована н.с. статора. Это поперечное поле ротора создает э.д.с. самоиндукции, вызывающую значительное изменение напряжения при изменении нагрузки и снижает  $\cos \alpha$  регулятора. Для компенсации поперечного поля ротора на статоре помещают короткозамкнутую компенсационную обмотку, ось которой повернута относительно оси основной обмотки статора на 90 эл. град.

Поворотный или вращающийся трансформатор представляет собой индукционный прибор, конструктивно сходный с асинхронной машиной, на роторе которой помещена фазная обмотка. Статор и ротор выполняют цилиндрическими с распределенными обмотками, помещаемыми в пазах статора и ротора. Поворотные трансформаторы используют в схемах счетно-решающих устройств для получения выходного напряжения в виде определенной функции угла поворота ротора.

Наиболее простой тип поворотного трансформатора (ПТ) — синусный и косинусный (рис. 26.7). На роторе и статоре такого трансформатора помещены однофазные обмотки. Обмотка статора включается в сеть переменного тока. Пульсирующее поле статора создает в обмотке ротора э.д.с., действующее значение которой зависит от положения ротора. При повороте ротора э.д.с. его обмотки изменяется пропорционально синусу или косинусу угла поворота ротора в зависимости от выбора исходного положения ротора.

Если обмотку ротора замкнуть на какое-либо сопротивление, то напряжение на выходе окажется не точно пропорциональным синусу или косинусу угла поворота. Это объясняется тем, что при нагрузке появится н.с. обмотки ротора  $F_r$ , направленная при повороте ротора под каким-либо углом  $\alpha$  к оси катушки статора. Эта н.с. может быть представлена в виде двух составляющих  $F_d$  и  $F_q$ . Продольная составляющая н.с. ротора  $F_d$  будет уравновешена возросшей н.с. статора, как в обычном трансформаторе. Поперечная составляющая  $F_q$  ничем не компенсируется и создает свой пульсирующий магнитный поток, частично пронизывающий вторичную обмотку и создающий в ней э.д.с. самоиндукции. В результате этого напряжение вторичной обмотки окажется уже не пропорциональным синусу или косинусу угла поворота  $\alpha$ . Если на роторе выполнить две однофазные обмотки, расположенные под углом 90° друг от друга, то при отсутствии нагрузки в этих обмотках создаются э.д.с.  $E_1 = E_{\max} \sin \alpha$  и  $E_2 = E_{\max} \cos \alpha$ .

При наличии нагрузки н.с. этих двух обмоток имеют продольные и поперечные составляющие. Продольные составляющие этих н.с. будут уравновешены возросшей н.с. обмотки статора, а попе-

перечные составляющие, направленные встречно, частично компенсируют друг друга. Таким образом, при двух обмотках на роторе поперечный магнитный поток ротора создается разностью поперечных составляющих н.с. двух обмоток и будет меньше, чем при одной обмотке на роторе. Следовательно, точность работы трансформатора с двумя обмотками на роторе выше, чем при одной обмотке.

В случае, когда вторичные обмотки симметричны, поперечные составляющие н.с. двух роторных обмоток равны и результирующий поперечный магнитный поток равен нулю, т. е. искажений в работе ПТ не вносится. Для устранения погрешности поперечный магнитный поток уничтожают с помощью короткозамкнутой обмотки, помещенной на статоре. Эта обмотка перпендикулярна обмотке возбуждения. Н.с. этой обмотки примерно равна и противоположна результирующей поперечной составляющей н.с. ротора.

Таким образом поворотный трансформатор имеет на статоре и на роторе по две однофазные обмотки, причем как на статоре, так и на роторе эти обмотки размещены так, что оси их перпендикулярны друг к другу. В некоторых случаях число обмоток на статоре и роторе может быть больше. Эти обмотки могут быть выполнены как мостовыми, так и разделенными.

В процессе работы поворотного трансформатора ПТ поворот ротора задается исполнительным двигателем и сам ПТ вращающего момента не развивает.

## § 26.4. Синхронная связь асинхронных машин

*Синхронной связью машин* называют такую систему, которая обеспечивает синхронное перемещение двух или нескольких механически несвязанных между собой осей каких-либо механизмов. Такие системы — необходимые элементы любого автоматического устройства, системы телепередачи и всюду, где требуется дистанционное управление, контроль или регулирование. Системы синхронной связи получили широкое применение для согласования частоты вращения двух или нескольких механизмов и для передачи угла поворота одного механизма другому. Систему согласования частоты вращения называют *синхронным валом*, а систему передачи угла поворота — *синхронной передачей угла*.

Системы синхронного вала осуществляют с помощью машин постоянного тока. Однако в силу ряда недостатков распространение таких систем ограничено. Наиболее часто систему синхронного вала осуществляют с использованием обычных трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором. В простейшем виде система синхронного вала показана на рис. 26.8. Два рабочих механизма *РМ-1* и *РМ-2* должны вращаться с одинаковыми частотами, но так как они находятся на значительном расстоянии друг от друга, их валы механически связать нельзя. Для синхронной связи механизмов электрическим путем валы рабочих механизмов соединяют с одинаковыми асинхронными двигателями *АД-1* и *АД-2*, у которых обмотки статоров включены в трехфазную сеть переменного

тока, а обмотки роторов соединены между собой. Если частоты вращения рабочих механизмов одинаковы, то роторы асинхронных двигателей имеют также одинаковую частоту вращения и равные э. д. с. в фазах обмоток роторов.

Так как обмотки роторов включены встречно, то тока в них нет и асинхронные машины не оказывают никакого влияния на работу механизмов, потребляя из сети токи х. х., необходимые для создания магнитных полей.

Если равенство частот вращения рабочих механизмов нарушится, то и роторы асинхронных двигателей будут вращаться с различными частотами. При этом э. д. с., создаваемые в фазах обмоток роторов двигателей АД-1 и АД-2, не будут равны, вследствие чего



Рис. 26.8. Схема системы синхронного вала

в этих обмотках появятся токи. В результате взаимодействия токов в роторе с вращающимися магнитными полями статоров будут созданы электромагнитные моменты, направленные так, чтобы устранить причину, создавшую эти токи. Асинхронная машина, сцепленная с валом механизма, имеющего меньшую частоту вращения, будет создавать вращающий момент и увеличивать частоту вращения этого механизма, а машина, сцепленная с валом механизма, имеющего большую частоту вращения, создает тормозной момент на валу и уменьшает частоту вращения этого механизма. Таким образом происходит поддержание равенства частот двух механизмов с высокой степенью точности.

Системы синхронной передачи угла применяют для дистанционного управления, регулирования и контроля. Простейшая схема синхронной передачи угла состоит из двух совершенно одинаковых индукционных электрических машин — сельсинов и линий связи. Эти сельсины называют *датчиком* и *приемником*. Поворотом ротора датчика задается какой-либо угол. Несмотря на отсутствие механической связи между сельсинами, ротор приемника поворачивается на такой же угол, следуя за ротором датчика.

В системах синхронной связи получили применение схемы трехфазного и однофазного тока.

В системах синхронного вала, предназначенных для передачи вращающего момента, используются трехфазные машины, так как эти машины развивают большие моменты по сравнению с однофазными при одинаковых размерах. В системах синхронной передачи угла, предназначенных для указательных и измерительных целей, преимущественно используются однофазные машины, режим работы и точность которых не зависит от направления вращения.

## § 26.5. Устройство контактных сельсинов

Сельсины получили широкое применение в качестве указательных синхронных систем передачи угла, у которых приемник имеет небольшую нагрузку и не требует значительных моментов. Эти машины выполняют по типу асинхронных машин с однофазной первичной и трехфазной вторичной обмоткой. Первичная однофазная обмотка может быть расположена на статоре, а вторичная — на роторе. Возможно и обратное расположение, т. е. первичная обмотка —

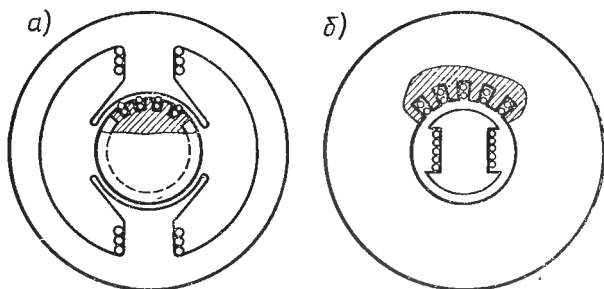


Рис. 26.9. Схема устройства контактных сельсинов с расположением первичной обмотки на статоре (а) и на роторе (б)

на роторе, а вторичная — на статоре. Размещение первичной однофазной обмотки на статоре, а трехфазной вторичной обмотки на роторе позволяет просто балансировать ротор, так как он выполнен в виде цилиндра. Недостаток такого размещения обмоток — большие размеры и вес ротора.

Размещение первичной однофазной обмотки на роторе, а вторичной трехфазной обмотки на статоре помимо меньших габаритов и массы позволяет получить на вторичной обмотке повышенное напряжение, что является целесообразным в случае, когда линия связи имеет большую длину. При расположении первичной однофазной обмотки как на статоре (рис. 26.9, а), так и на роторе (рис. 26.9, б) сельсины выполняют преимущественно с явно выраженными полюсами, так как у машин с распределенной обмоткой требуется дополнительная короткозамкнутая обмотка для увеличения крутизны характеристики моментов при малых углах рассогласования, что усложняет конструкцию машины.

При расположении первичной однофазной обмотки на статоре ярмо, полюсы и сердечник ротора набирают из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. На полюсах статора помещают однофазную обмотку, состоящую из двух последовательно соединенных катушек верхнего и нижнего полюса. Эту обмотку включают в однофазную сеть переменного тока. В пазах ротора размещена трехфазная распределенная обмотка, соединенная звездой. Начала фаз обмотки ротора соединяют с тремя контактными кольцами, изготовленными из сплава серебра, что необходимо для

уменьшения переходного сопротивления скользящих контактов. Принципиально выполнено также устройство сельсина с первичной обмоткой, помещенной на роторе, и вторичной обмоткой — на статоре. При таком расположении потребуется только два контактных кольца.

Сельсины выполняют двухполюсными, что обеспечивает их самосинхронизацию в пределах одного оборота. При использовании многополюсных машин в пределах одного оборота синхронная связь теряет свое ценное свойство самосинхронизации.

## § 26.6. Рабочий процесс синхронной передачи угла

В зависимости от схемы соединения сельсины могут быть использованы в двух основных режимах работы — индикаторном и трансформаторном.

**Индикаторный режим работы.** Сельсины-приемники, работающие в индикаторном режиме (рис. 26.10), сами отрабатывают угол, заданный датчиком. С помощью таких сельсинов осуществляется поворот на заданный угол двух или нескольких механически несвязных осей с незначительным моментом сопротивления.

Из рисунка видно, что первичные обмотки двух сельсинов (датчика и приемника) включены в однофазную сеть переменного тока, вторичные обмотки соединены между собой одноименными зажимами. При включении однофазных первичных обмоток обоих сельсинов в сеть переменного тока создаются пульсирующие магнитные поля, которые индуцируют в каждой фазе вторичных обмоток э. д. с. Эти э. д. с. совпадают по фазе, но различны по величине, которая зависит от положения этой фазы относительно первичной обмотки. Действующие значения этих э. д. с.:

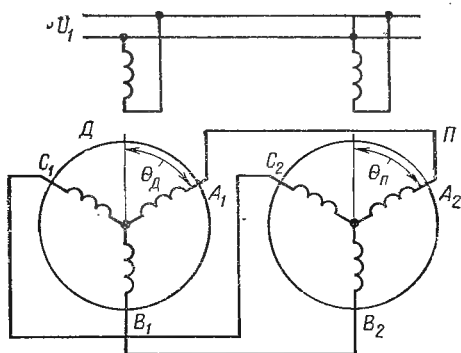


Рис. 26.10. Схема соединения сельсинов при индикаторном режиме работы

$$E_{AD} = E_{\max} \cos \theta_D \text{ и } E_{AN} = E_{\max} \cos \theta_N;$$

$$E_{BD} = E_{\max} \cos (\theta_D - 2\pi/3) \text{ и } E_{BN} = E_{\max} \cos (\theta_N - 2\pi/3);$$

$$E_{CD} = E_{\max} \cos (\theta_D - 4\pi/3) \text{ и } E_{CN} = E_{\max} \cos (\theta_N - 4\pi/3).$$

Если роторы датчика и приемника расположены одинаково относительно первичных обмоток ( $\theta_D = \theta_N$ ), то в одинаковых фазных вторичных обмотках датчика и приемника будут индуцироваться равные по величине э. д. с., уравновешивающие друг друга. Токов

во вторичных обмотках и линии связи нет. Такое положение роторов называют *согласованным*. Если ротор датчика будет занимать относительно первичной обмотки положение, отличное от положения ротора приемника ( $\theta_D \neq \theta_H$ ), то равновесия э. д. с., индуцируемых в фазах вторичных обмоток датчика и приемника, не будет. Вследствие этого возникнут уравнивающие токи, протекающие по вторичным обмоткам и линии связи. В результате взаимодействия токов вторичных обмоток обоих сельсинов с магнитными полями первичных обмоток создаются вращающие моменты, стремящиеся повернуть роторы датчика и приемника. Если ротор датчика удерживать в определенном положении, а ротору приемника предоставить возможность вращаться, то он повернется в том же направлении, в котором повернут ротор датчика относительно согласованного положения. Поворачивается ротор приемника до тех пор, пока не восстановится равновесие э. д. с., т. е. пока ротор приемника не займет положения, согласованного с ротором датчика.

Синхронизирующий момент, развиваемый сельсином,

$$M_{\text{сх}} = M_{\text{max}} \sin \theta,$$

где  $M_{\text{max}}$  — максимальный момент;  $\theta = \theta_D - \theta_H$  — угол рассогласования.

Максимальный момент  $M_{\text{max}}$  зависит от амплитуды магнитного потока статора  $\Phi_{\text{max}}$ , тока в роторе  $I_2$  и угла сдвига фаз между током ротора и магнитным потоком  $\gamma$ , т. е.  $M_{\text{max}} = c \Phi_{\text{max}} I_2 \cos \gamma$ , где  $c$  — конструктивная постоянная.

Учитывая, что  $\gamma = 90^\circ + \varphi_2$ , где  $\varphi_2$  — угол сдвига фаз между э. д. с. и током в роторе, выражение максимального момента будет  $M_{\text{max}} = c \Phi_{\text{max}} I_2 \cos (90^\circ + \varphi_2) = -c \Phi_{\text{max}} I_2 \sin \varphi_2$ , т. е. при увеличении угла  $\varphi_2$  синхронизирующий момент увеличивается. Если увеличить длину линии связи, то активное сопротивление цепи ротора повысится, а синхронизирующий момент уменьшается, так как уменьшается угол  $\varphi_2$ . Следует помнить, что при работе сельсинов будет иметь место некоторый угол рассогласования. Для трогания с места ротор приемника должен развить достаточный вращающий момент трогания  $M_{\text{тр}}$ , и поэтому ротор приемника начнет вращаться не одновременно с ротором датчика, а только при наличии угла рассогласования, при котором синхронизирующий момент станет равным моменту трогания:

$$M_{\text{max}} \sin \Delta \theta = M_{\text{тр}} = M_0 + M_{\text{н}} + M_{\text{д}},$$

где  $M_0$  — момент сопротивления, обусловленный потерями х. х.;  $M_{\text{н}}$  — момент сопротивления нагрузки;  $M_{\text{д}}$  — динамический момент, необходимый для ускорения вращения подвижных частей приемника.

При равномерном вращении ротора датчика и приемника динамический момент равен нулю и синхронизирующий момент равен сумме моментов сопротивления:  $M_{\text{max}} \sin \Delta \theta = M_0 + M_{\text{н}}$ .

На практике часто используют более сложные схемы синхронной связи, в которых к одному датчику параллельно присоединяют

несколько приемников (рис. 26.11), одновременно обрабатывающих угол, задаваемый ротором датчика. При  $n$  параллельно включенных приемниках, работающих от одного датчика, каждый приемник развивает нормальный статический момент только в случае, если датчик имеет сопротивление фазы обмотки ротора, в  $n$  раз меньшее сопротивления фазы обмотки приемника.

Синхронизирующий момент приемника будет тем больше, чем больше мощность датчика, и тем меньше, чем больше число параллельно включаемых приемников. Устойчивость приемника в согласованном положении растет с увеличением числа приемников, так

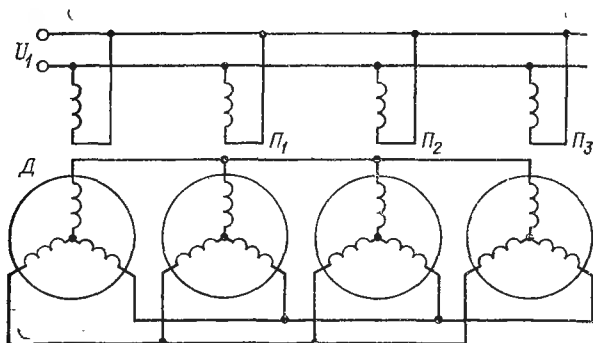


Рис. 26.11. Схема соединения трех сельсинов-приемников

как на приемник действует не только датчик, но и другие приемники. Если один из приемников окажется нагруженным больше других, то как в этом, так и в других приемниках возникает рассогласование с датчиком, так как более нагруженный приемник превращается в датчик по отношению к другим приемникам, что приводит к увеличению ошибки. Точно так же изменение нагрузки одного из приемников вызывает изменение угла рассогласования в других приемниках.

**Трансформаторный режим работы.** При работе сельсинов в трансформаторном режиме нет передачи момента. В этом случае сельсин-приемник поворачивается на заданный угол не самостоятельно, а с помощью специального вспомогательного двигателя. При этом значительно повышается точность синхронной передачи.

При работе сельсинов в трансформаторном режиме (рис. 26.12) входной сигнал задается в виде напряжения, а не вращения какого-либо вала или угла рассогласования между осями. В этом случае только первичная обмотка датчика включается в сеть переменного тока, а первичная обмотка приемника является выходной обмоткой, замкнутой на усилитель следящей системы или измерительный прибор ( $Z_H$ ). Напряжение этой обмотки является выходным сигналом синхронной передачи. Вторичные трехфазные обмотки датчика и приемника соединяются между собой так же, как и при индикаторном режиме.



При включении однофазной первичной обмотки датчика в сеть переменного тока будет создано пульсирующее магнитное поле, индуктирующее в фазах вторичных обмоток датчика э. д. с.:

$$E_{АД} = E_{\max} \cos \theta; \quad E_{ВД} = E_{\max} \cos (\theta - 2\pi/3); \quad E_{СД} = E_{\max} \cos (\theta - 4\pi/3).$$

Так как обмотки ротора приемника соединены с обмотками ротора датчика, то по этим обмоткам под действием вторичных э. д. с. датчика протекают токи. Эти токи создают пульсирующее магнитное поле, которое займет в пространстве такое же положение отно-

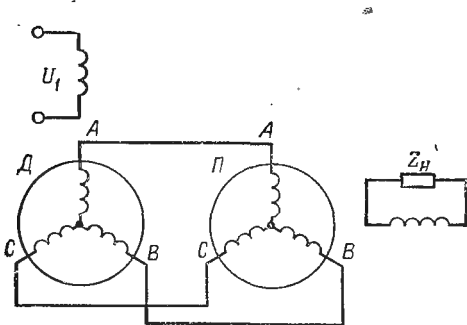


Рис. 26.12. Схема соединения сельсинов при трансформаторном режиме работы

сительно обмотки статора приемника, какое занимает обмотка статора датчика относительно своих роторных обмоток. Таким образом, в обмотке статора приемника индуктируется э. д. с., величина которой зависит от взаимного расположения роторов датчика и приемника. Если ось обмотки статора приемника трансформатора совпадает с направлением пульсирующего поля ротора, то выходное напряжение максимально, и если ось этой обмотки перпендикулярна на-

## § 26.7. Бесконтактные сельсины

В системе синхронной связи наличие скользящего контакта между щетками и контактными кольцами приводит к повышению момента, обусловленного потерями на трение, что снижает точность синхронной передачи, так как увеличивается начальный угол рассогласования. Поэтому в системах синхронной передачи высокой точности желательно использование бесконтактных сельсинов, в которых первичные и вторичные обмотки неподвижны.

В машинах обычной конструкции обмотку возбуждения помещают на роторе. При включении этой обмотки в сеть переменного тока создается пульсирующее магнитное поле, направление которого зависит от положения ротора. При повороте ротора на какой-либо угол повернется и пульсирующая н. с. обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения поворачивается вместе с ротором и соединяется с сетью посредством скользящих контактов между щетками и контактными кольцами. Для устранения скользящего контакта обмотку возбуждения надо сделать неподвижной.

В бесконтактных сельсинах ротор выполняется в виде двух полюсов 1, разделенных значительным немагнитным промежутком 2 (рис. 26.13). Обмотка возбуждения выполнена в виде двух неподвижных катушек 3, охватывающих ротор. Если такой ротор поместить в расточку статора 4, то магнитный поток замкнется от одного полюса ротора к другому через тело статора. При вращении ротора будет меняться в пространстве направление магнитного поля, созданного обмоткой возбуждения, несмотря на то, что обмотка остается неподвижной. При такой конструкции на пути магнитного потока добавляется два воздушных промежутка между полюсами ротора и внешним магнитопроводом, что повышает магнитное сопротивление. Поэтому намагничивающие токи в бесконтактных сельсинах оказываются большими, чем в машинах обычной конструкции. Бесконтактный сельсин, так же как и контактный, имеет однофазную первичную обмотку возбуждения 3 и трехфазную вторичную 5. Последнюю выполняют распределенной и помещают в пазах статора, который имеет устройство, подобное устройству статора обычной асинхронной машины. Полюсы ротора собирают из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. Оба полюса ротора укрепляют на валу и заливают пластмассой.

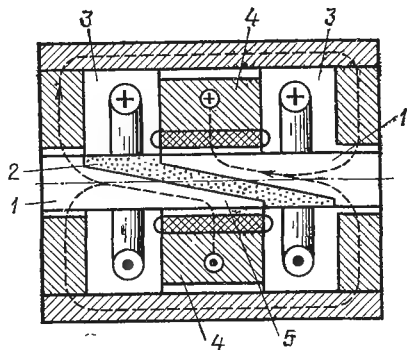


Рис. 26.13. Схема устройства бесконтактного сельсина

имеет однофазную первичную обмотку возбуждения 3 и трехфазную вторичную 5. Последнюю выполняют распределенной и помещают в пазах статора, который имеет устройство, подобное устройству статора обычной асинхронной машины. Полюсы ротора собирают из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. Оба полюса ротора укрепляют на валу и заливают пластмассой.

### § 27.1. Принцип действия синхронной машины

На рис. 27.1 изображена схема четырехполюсной синхронной машины. На сердечнике статора 1 помещена обмотка якоря 3. Если ротор с полюсами 2 привести во вращение первичным двигателем, а к обмотке возбуждения 4 подвести постоянный ток через контактные кольца 5, то возникает магнитное поле, вращающееся с частотой вращения ротора.

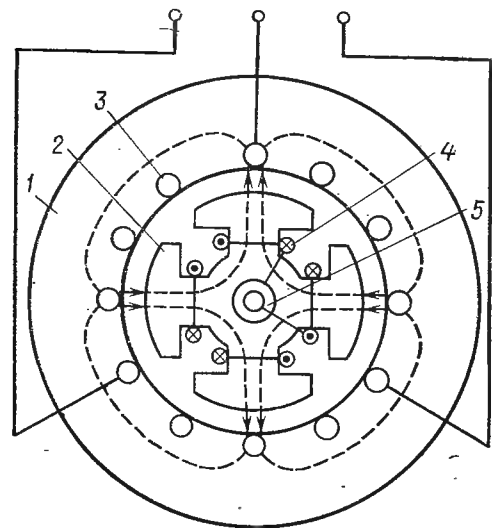


Рис. 27.1. Электромагнитная схема четырехполюсной синхронной машины

Линии магнитного поля будут пересекать проводники обмотки якоря, индуцируя в ней переменную э. д. с. Полный цикл изменения э. д. с. происходит за время, в течение которого ротор повернется на угол, соответствующий паре соседних полюсов. В четырехполюсной машине один оборот ротора соответствует двум периодам, в машине, имеющей  $p$  пар полюсов, один оборот ротора соответствует  $p$  периодам, а частота э. д. с.  $f = = pn/60$  (Гц), где  $n$  — частота вращения ротора:

Если обмотку статора включить в трехфазную сеть, то в ней возникнут токи, создающие магнитное поле, вращающееся с неизменной синхронной частотой  $n$  при постоянной частоте тока  $f$ . Обмотка возбуждения в свою очередь создает поле полюсов, которое, вращаясь вместе с ротором с синхронной частотой  $n$ , будет неподвижно относительно поля статора. Машина переменного тока, частота вращения ротора которой находится в строгой зависимости

от частоты тока сети и равна частоте вращения магнитного поля, участвующего в процессе преобразования энергии, называется *синхронной*.

Принцип действия синхронной машины поясняет рис. 27.2, на котором магнитные поля ротора и статора изображены в виде двух систем полюсов, вращающихся с одинаковой синхронной частотой  $n$  в направлении, указанном стрелками. При отсутствии тока в обмотке статора (холостой ход) возбужденный ротор вращается с синхронной частотой  $n$  за счет момента первичного двигателя  $M_1$ . Линии магнитного поля в полюсах статора составляют продолже-

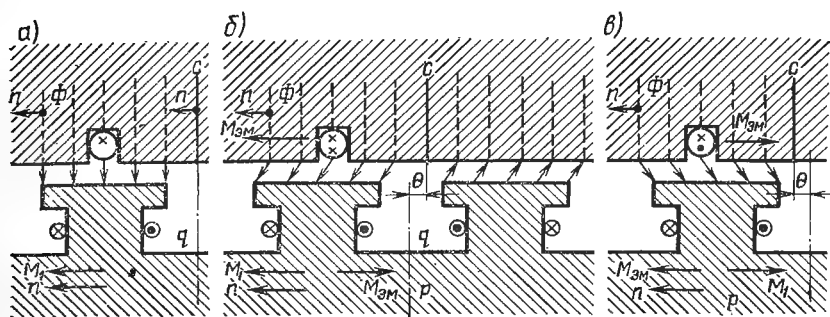


Рис. 27.2. Схемы режимов работы синхронной машины

ние линий поля ротора, и оси магнитных полей статора и ротора совпадают (рис. 27.2, а). В этом случае силовые линии магнитного поля в зазоре не испытывают никакого растяжения. Направление э. д. с., индуцируемой в проводниках обмотки статора магнитным потоком  $\Phi$ , определено по правилу правой руки (обозначено  $\times$ ).

Если увеличить вращающий момент  $M_1$  первичного двигателя, то ротор машины начнет смещаться относительно полюсов статора вперед по направлению вращения, угол  $\theta$  между осями магнитных полей статора и ротора увеличится (рис. 27.2, б). Силовые линии магнитного поля в зазоре располагаются наклонно, и появляется тангенциальная составляющая вектора магнитной индукции, направленная по касательной к окружности ротора в сторону, противоположную его вращению. В этом случае на ротор кроме механической силы первичного двигателя будет действовать электромагнитная сила, создающая электромагнитный момент  $M_{эм}$ , направленный встречно моменту  $M_1$ . Увеличение угла  $\theta$  и противодействующего момента  $M_{эм}$  будет продолжаться до тех пор, пока  $M_{эм}$  не станет равным  $M_1$ . После этого увеличение угла  $\theta$  прекратится и машина заработает в установившемся режиме с постоянной синхронной частотой  $n$ . Чрезмерное увеличение момента  $M_1$ , а следовательно, и угла  $\theta$  недопустимо, так как может нарушиться электромагнитное взаимодействие между магнитными полями ротора и статора. По направлению силы  $F_{эм}$ , приложенной к обмотке ста-

тора, согласно правилу левой руки находим направление тока в проводниках обмотки статора (обозначено  $\times$ ). В этом случае направление тока и э. д. с. в обмотке статора совпадают, следовательно, машина работает в режиме генератора.

Если обмотка статора синхронной машины включена в сеть переменного тока и на валу ее имеется какая-либо механическая нагрузка, то момент  $M_1$  будет тормозным, направленным против вращения ротора. На рис. 27.2, в показано, что в этом случае ось поля статора сместилась относительно оси поля ротора на угол  $\theta$  по направлению вращения ротора, вследствие чего изменились наклон магнитных линий в зазор и направление момента  $M_{\text{эм}}$ , т. е. момент становится вращающим и синхронная машина работает в режиме двигателя. Таким образом, в генераторном режиме работы синхронной машины ось поля ротора опережает ось поля статора на угол  $+\theta$ , а в двигательном режиме отстает на угол  $-\theta$ . Угол  $\theta$  характеризует нагрузку в любом режиме работы машины.

Наиболее распространенная форма конструкции синхронной машины — расположение обмотки якоря на статоре, а обмотки возбуждения — на роторе. В этом случае для включения обмотки якоря в сеть переменного тока требуется три или четыре неподвижных контакта, что особенно важно при больших мощностях и высоких напряжениях. Включение обмотки возбуждения в сеть постоянного тока через два контактных кольца и щетки не вызывает затруднений, так как напряжение не превышает 300—400 В, а мощность, потребляемая ею, составляет всего 0,2—2,5% номинальной мощности машины.

Наиболее широкое применение получили синхронные машины в качестве генераторов переменного тока, которые установлены на всех стационарных и передвижных электрических станциях.

Широко применяют синхронные двигатели используемые для установок большой мощности (свыше 50 кВт), не требующих регулирования частоты вращения. Специальные синхронные микродвигатели (от долей до нескольких десятков ватт) применяют в схемах автоматического управления и регулирования.

Кроме того синхронная машина может служить источником реактивной мощности и применяется для повышения коэффициента мощности. Такую машину называют *синхронным компенсатором*, который широко применяют при передаче электрической энергии и ее распределении.

## **§ 27.2. Основные элементы конструкции синхронных машин**

Свойства первичного двигателя оказывают существенное влияние на конструктивное исполнение соединенного с ним генератора.

Паровая турбина — машина быстроходная, поэтому для больших мощностей явнополусная конструкция ротора становится неприемлемой, так как она не обеспечивает необходимую механическую прочность. Турбогенераторы выполняют с неявнополусным

цилиндрическим ротором, для которого применяют поковку из стали высокого качества. Диаметр ротора зависит от прочности материала, и поэтому увеличение мощности машины может идти до определенных пределов за счет увеличения осевой длины.

Гидравлическая турбина — машина тихоходная, так как частота вращения ее определяется напором воды в реках, причем максимальная частота возможна при установке турбин на горных реках. Поэтому гидрогенераторы выполняют явнополюсными с боль-

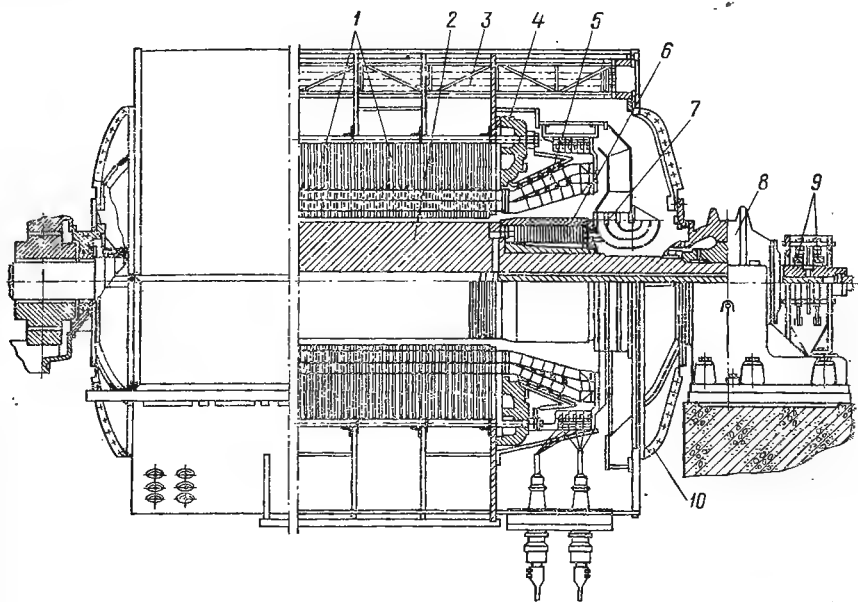


Рис. 27.3. Продольный разрез турбогенератора

шим количеством полюсов и имеют относительно большой диаметр и небольшую длину. Генераторы, сочлененные с двигателем внутреннего сгорания, обычно явнополюсные, но с горизонтальным расположением вала, тогда как в гидрогенераторах вертикальное расположение вала.

На рис. 27.3 показан продольный разрез неявнополюсного синхронного турбогенератора мощностью 100 000 кВ·А с водородным охлаждением. Наиболее напряженной в механическом и тепловом отношении частью машины является ротор, сердечник которого изготавливается из высококачественной стали. В пазах ротора помещают провода (шины прямоугольного сечения) обмотки возбуждения 6. В пазовой части обмотки возбуждения закрепляются клиньями из немагнитного материала, а лобовые ее части крепятся бандажами из немагнитной стали. По обеим сторонам ротора на его валу 2 устанавливаются вентиляторы 7 (чаще всего пропеллерного типа), обеспечивающие циркуляцию охлаждающего газа в машине. На валу ротора со стороны возбудителя размещаются сталь-

ные контактные кольца 9. Ротор вращается в подшипниках скольжения 8, расположенных либо на отдельных стойках, либо в торцевых щитах генератора. У турбогенераторов большой мощности подшипники встраиваются в торцевые щиты 10, что приводит к сокращению расстояния между опорами, уменьшению габаритов и повышению виброустойчивости. Между статором и корпусом машины находится охладитель 3. Корпус турбогенераторов изготавливается сварным. Для генераторов мощностью свыше 100 000 кВт, имеющих водородное охлаждение, он обладает не только значительной прочностью, но и герметичностью. Сердечник статора 1 шихтуется из листовой стали в кольцевой магнитопровод с радиальными пазами. Обычно применяется холоднокатаная сталь с повышенным содержанием кремния. Она характеризуется высокой магнитной проводимостью и малыми удельными потерями. Сердечник статора состоит из отдельных пакетов, разделенных друг от друга кольцевыми радиальными каналами, образованными сегментами с распорками, и уплотняется нажимными плитами 4. В открытые пазы прямоугольной формы статора укладывается двухслойная стержневая обмотка 5 с укороченным шагом. Лобовые части стержней обмотки статора, имеющие форму эвольвенты, прикрепляются к нескольким бандажным кольцам, охватывающим их снаружи и препятствующим отгибу лобовых частей в сторону сердечника статора.

В СССР изготовлен турбогенератор типа ТВВ-1200-2 с водяным и водородным охлаждением, мощностью 1 200 000 кВт·А, напряжением 24 кВ и частотой вращения 3000 об/мин. Он предназначен для выработки электроэнергии при непосредственном соединении с паровой турбиной.

Большинство мощных гидрогенераторов, установленных на ГЭС низкого напора, имеет вертикальный вал, соединенный при помощи фланца с валом турбины, расположенной под генератором. В последнее время большое распространение получили погружные капсульные гидрогенераторы с горизонтальным валом.

Масса вращающейся части гидрогенератора с вертикальным валом и давление воды на рабочее колесо турбины воспринимаются опорным подшипником (подпятником). В мощных гидрогенераторах давление на подпятник измеряется несколькими тысячами тонн.

По расположению подпятника относительно сердечника ротора вертикальные генераторы делятся на два типа:

1. Подвесного типа (рис. 27.4), у которого подпятник 3 расположен на верхней крестовине 5 выше сердечника ротора. В этом случае достигается наибольшая механическая устойчивость вращающегося ротора, но для опоры подпятника требуется массивная верхняя крестовина. Поэтому, как правило, гидрогенераторы подвесного типа имеют сравнительно большую скорость, ограниченный диаметр статора и нагрузку подпятника.

2. Зонтичного типа (рис. 27.5), у которого подпятник 3 располагается на нижней крестовине 5, ниже сердечника ротора. Так

как нижняя крестовина имеет меньший диаметр, то масса ее меньше. При очень больших диаметрах статора и давлении на подпятник (тихоходные генераторы) более рациональным является зонтичный тип. Кроме того, генератор зонтичного типа имеет высоту меньше, чем генератор подвесного типа, что позволяет снизить

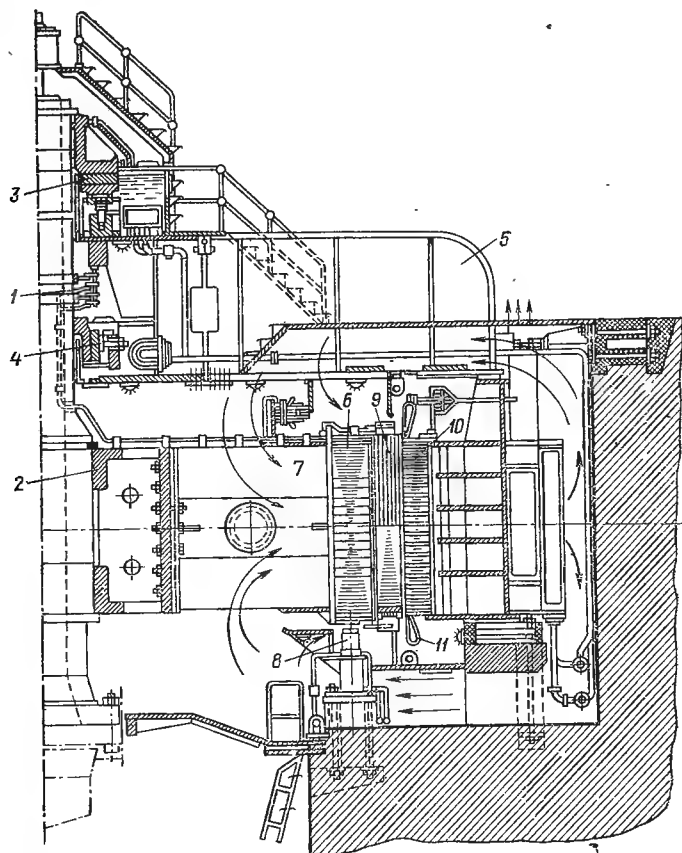


Рис. 27.4. Продольный разрез гидрогенератора подвесного типа

высоту здания ГЭС. Кроме подпятника гидрогенераторы имеют один или два радиальных (направляющих) подшипника 4, воспринимающих только радиальные усилия.

Сердечники статоров 10 с обмотками 11 в генераторах подвесного и зонтичного типов имеют одинаковое устройство.

Статору гидрогенератора придают принципиально такую же конструкцию, как и статору турбогенератора, но в отличие от последнего из-за большого размера делают разъемным, деля его по окружности чаще всего на шесть равных частей.



В машинах с большим диаметром ротора его сердечником служит обод 6, собираемый на спицах 7, которые крепятся на втулке ротора 2.

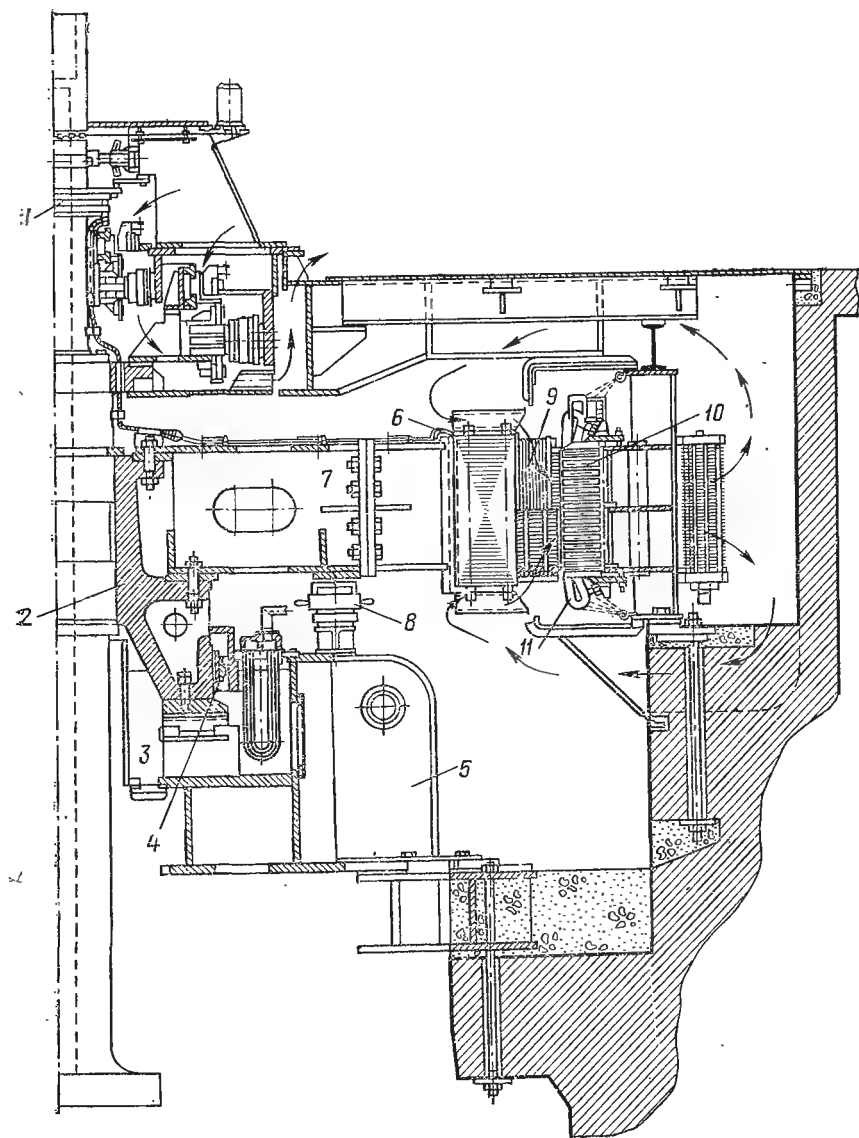


Рис. 27.5. Продольный разрез гидрогенератора зонтного типа

Полюс ротора 9 состоит из стального сердечника, катушки обмотки возбуждения и демпферной (успокоительной) обмотки, размещенной в полюсных наконечниках. Сердечник полюса собирает-

ся из листовой стали 1—2 мм и стягивается шпильками. Торцевые части сердечника изготавливаются из стальной поковки или толстого стального листа. Демпферная обмотка выполняется из круглых медных стержней, концы которых впаяны в сегменты. Сегменты отдельных полюсов соединяются при помощи тепловых компенсаторов из медной фольги и образуют замкнутую демпферную обмотку. Катушка обмотки возбуждения изготавливается из медных изолированных шин прямоугольного поперечного сечения.

Питание обмотка возбуждения получает через контактные кольца 1, изготавливаемые из стали. На контактных кольцах помещены угольные щетки, укрепленные в щеткодержателях.

Во избежание длительной работы подпятника на малых оборотах при остановке гидрогенераторов необходимо торможение, которое осуществляется при помощи пневматических тормозов 8, устанавливаемых под ротором, а на нижней части ротора тормозные диски.

Ротор гидрогенератора соединяется с турбиной валом. Размеры ротора зависят от его частоты вращения. По условиям работы гидравлической турбины возможен случай, когда при отключении генератора от сети агрегат увеличит частоту вращения в 1,7—2,5 раза по сравнению с номинальной  $n$ .

Эта так называемая угонная частота  $n_y$  определяет наибольшие возможные, по условию механической прочности, размеры диаметра ротора. Максимально допустимая угонная окружная скорость в зависимости от материала обода ротора составляет  $v_{ny} = 110 \div 130$  м/с. Поэтому при угонной частоте  $n_y = 2,5n$  номинальная окружная скорость  $v_y$  не превосходит примерно 50 м/с, а диаметр ротора  $D_r$  не более  $60 v_y / \pi n = 910 / n$ .

Возбудителем является машина постоянного тока. Возбудитель и подвозбудитель, если он применяется, располагаются на одном валу. Иногда размеры подвозбудителя позволяют разместить его внутри коллектора возбудителя.

Самый мощный в мире вертикальный гидрогенератор СВФ 1270/230 — 44 зонтичного типа без собственного вала построен в СССР и имеет мощность 530 000 кВт·А, напряжение 15 750 В.

На специальных гидроэлектростанциях, покрывающих пиковые нагрузки в энергосистеме, устанавливают вертикальный обратимый гидрогенератор-двигатель. В часы максимума нагрузки он работает генератором, а в часы уменьшения нагрузки (ночью) — двигателем, вращая турбину, которая теперь становится насосом и перекачивает воду в водохранилище, создавая запас ее для последующей работы электростанции в период максимума нагрузки в энергосистеме.

В настоящее время широкое применение получили капсульные гидрогенераторы с горизонтальным валом (рис. 27.6). Они устанавливаются непосредственно в потоке воды внутри водонепроницаемой капсулы 1. Отличительная особенность капсульных гидрогенераторов — малый диаметр статора. Ротор 4 гидрогенератора, укрепленный на валу 3, поддерживается двумя сегментными под-

шипниками. Подпятник 2 генератора воспринимает осевую нагрузку от рабочего колеса турбины 7. Обмотки статора и ротора имеют непосредственное водяное охлаждение. Статор 5 имеет обычную конструкцию. Вода поступает через направляющий аппарат турбины 6. Катушки обмотки ротора выполняются из полых медных проводников. В остальном конструкция горизонтальных капсульных генераторов не отличается от конструкции вертикальных гидрогенераторов. Мощность капсульных гидрогенераторов в настоящее время достигает несколько десятков тысяч кВт·А.

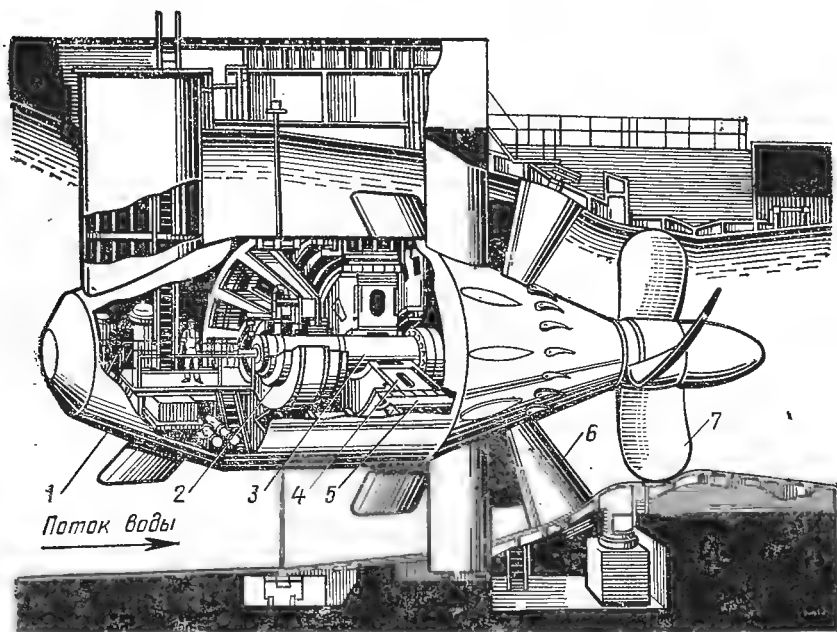


Рис. 27.6. Капсульный гидрогенератор

Генераторы малой мощности (мощностью до 1000 кВт·А), соединенные с двигателем внутреннего сгорания, находят широкое применение в передвижных или малых стационарных электростанциях. Обычно эти генераторы выполняют явнополюсными (рис. 27.7).

Генераторы выполняются горизонтальными на двух щитовых подшипниках. Возбудитель может быть прикреплен к фланцу на торце щита и иметь общий вал с генератором или установлен на общей фундаментной плите и соединен с машиной эластичной муфтой.

Станина 8 и щиты генераторов 5 — литые чугунные, некоторые генераторы имеют станину сварную неразъемную из листовой стали. Сердечник статора 6 набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, которые запрессовывают в расточку стани-

ны и закрепляют в ней стопорной шпилькой или нажимными кольцами. Пазы сердечника статора 9 полузакрытые или открытые, в которых помещают обмотку статора (катушечную, двухслойную с укороченным шагом).

Ротор генератора состоит из цельнокованого вала 12, остова 11 и полюсов 10. Катушки обмотки возбуждения удерживаются на полюсах полюсными наконечниками 7. Контактные кольца 3 у генераторов мощностью до 75 кВ·А из меди насажены на изолирован-

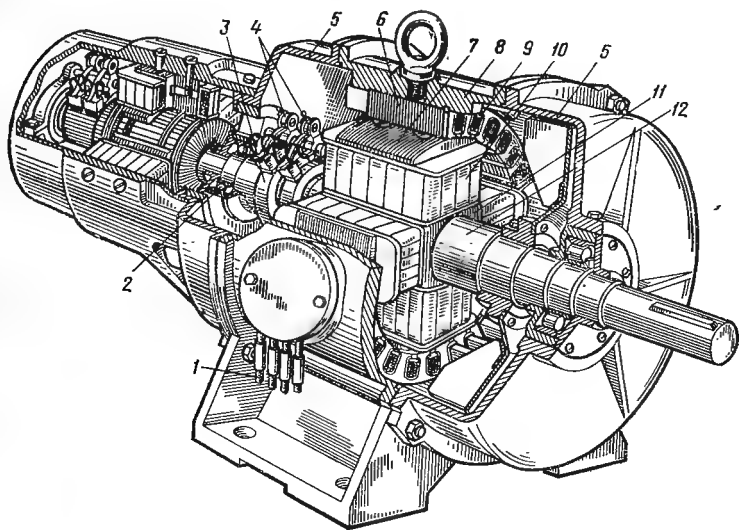


Рис. 27.7. Синхронный генератор малой мощности

ную миканитом стальную втулку и расположены внутри подшипникового щита со стороны возбуждателя. Для генераторов мощностью свыше 75 кВ·А контактные кольца (стальные) крепятся болтами через пластмассовые втулки к фланцу, насаженному на торец вала. На контактных кольцах расположены щетки, закрепленные в щеткодержателях 4. Обмотка статора соединяется с внешней сетью выводами 1.

Генераторы рассчитаны на продолжительный режим работы при температуре окружающей среды  $-40 \text{ — } +40^\circ \text{C}$  и относительной влажности до 95%.

Синхронные двигатели предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (вентиляторов, насосов, мельниц и т. д.). Они в подавляющем числе случаев имеют горизонтальное расположение вала и явнополюсный ротор.

Остов ротора быстроходного двигателя набирается из листового стали и скрепляется шпильками или электрозаклепками.

У тихоходных двигателей остов ротора представляет собой массивное кольцо, привариваемое к диску, который в свою очередь крепится на втулке, насаживаемой на вал. Сердечники полюсов

выполняются из листовой стали толщиной 1—1,6 мм и крепятся к остоу ротора.

Пусковая обмотка (для запуска двигателя) похожа на беличью клетку асинхронных двигателей. Она состоит из круглых медных или латунных стержней, расположенных в отверстиях полюсных наконечников, и двух медных короткозамыкающих сегментов, к которым припаиваются стержни каждого полюса. Все сегменты полюсов соединяются между собой медными накладками, образуя по одному непрерывному кольцу с каждой стороны.

Синхронные компенсаторы предназначены для работы в качестве генераторов реактивной мощности и служат для улучшения коэффициента мощности и регулирования напряжения. Синхронные компенсаторы, как правило, имеют горизонтальное расположение вала. Компенсаторы строятся на мощности до 100 000 кВ·А, напряжением 6600, 11 000 В.

Компенсаторы имеют принципиально ту же конструкцию статора, что и генераторы. Ротор вращается в подшипниках скольжения, которые могут быть выносные на стойках либо встроенные в торцевые щиты, закрывающие корпус компенсатора.

Полюсы роторов компенсаторов всех мощностей изготавливаются массивными стальными литыми или коваными. Крепление полюсов к остову осуществляется двумя Т-образными хвостами и клиньями.

## Глава 28

### РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

#### § 28.1. Основные понятия

При холостом ходе в синхронном генераторе имеется только основной магнитный поток  $\Phi_{\text{в}}$ , создаваемый н. с. обмотки возбуждения  $F_{\text{в}}$ .

При нагрузке ток, протекающий по обмотке якоря, создает н. с. якоря  $F_{\text{а}}$ , возбуждающую магнитный поток якоря. Магнитный поток якоря  $\Phi_{\text{а}}$  совместно с основным потоком  $\Phi_{\text{в}}$  образуют результирующий магнитный поток генератора  $\Phi$ .

Реакция якоря представляет собой воздействие н. с. якоря на результирующий магнитный поток генератора. Реакция якоря синхронного генератора зависит от величины тока якоря, параметров генератора, степени насыщения и характера нагрузки (активная, индуктивная, емкостная и смешанная). Особенно значительное влияние на напряжение генератора оказывает реакция якоря при индуктивной нагрузке. Н. с. обмотки якоря неподвижна относительно обмотки возбуждения. У машины с вращающимися полюсами н. с. якоря вращается вместе с полюсами, а при неподвижных полюсах н. с. обмотки якоря также неподвижна в пространстве, так как поле вращается в сторону, противоположную вращению ротора.

В синхронных машинах принята теория двух реакций, которая

рассматривает поток реакции якоря, состоящим из продольного и поперечного потоков.

Обозначим через  $F_B$  н. с. обмотки возбуждения (рис. 28.1),  $F_a$  н. с. обмотки якоря,  $I$  ток якоря,  $E_0$  э. д. с., индуктированную потоком обмотки возбуждения, и  $\Psi$  угол сдвига фаз между  $E_0$  и  $I$ . Реактивную составляющую тока якоря

$$I_d = I \sin \Psi \quad (28.1)$$

называют *продольным током*. Она возбуждает продольную реакцию якоря.

Активную составляющую тока якоря

$$I_q = I \cos \Psi \quad (28.2)$$

называют *поперечным током*. Она возбуждает поперечную реакцию якоря. На диаграмме рис. 28.1 показаны составляющие  $I_d$  и  $I_q$  отстающего тока  $I$ .

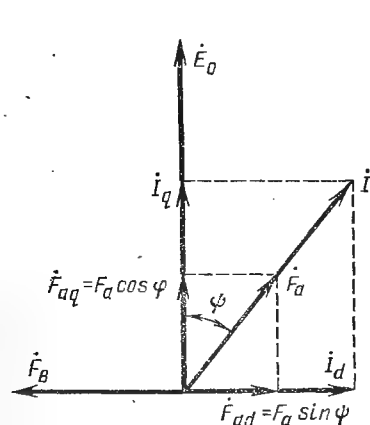


Рис. 28.1. Векторная диаграмма токов, э. д. с. и н. с.

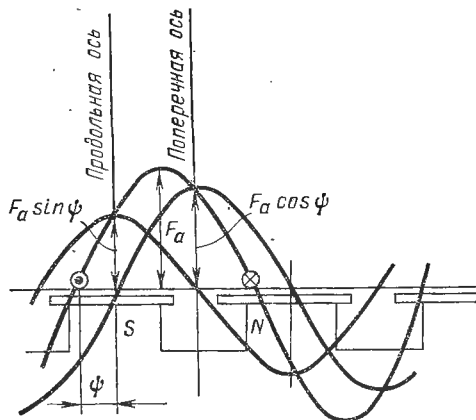


Рис. 28.2. Пространственное распределение первой гармонической составляющей н. с. реакции якоря

На рис. 28.2 изображено пространственное распределение первой гармонической составляющей н. с. реакции якоря — продольной составляющей, амплитуда которой  $F_a \sin \Psi$  направлена по продольной оси машины, и поперечной составляющей, амплитуда которой  $F_a \cos \Psi$  направлена по поперечной оси машины. Для вычисления результирующей н. с. необходимо учесть неодинаковую форму кривых распределения н. с. обмотки якоря и обмотки возбуждения. В явнополюсной машине продольный и поперечный потоки якоря встречают неодинаковые сопротивления магнитопровода, что учитывается коэффициентами реакции якоря. Поэтому расчетными величинами н. с. якоря будут по продольной оси

$$F_{ad} = k_d F_a \sin \Psi; \quad (28.3)$$

по поперечной оси

$$F_{aq} = k_q F_a \cos \Psi, \quad (28.4)$$

где  $k_a$  и  $k_q$  — коэффициенты, соответственно изменяющие величины н. с.

Для неявнополюсной машины, где магнитное сопротивление одинаково по продольной и поперечной осям, нет надобности в этих коэффициентах. Здесь расчетная величина н. с.

$$F'_a = k_a F_a. \quad (28.5)$$

Как указывалось выше, реакция якоря зависит от характера нагрузки, т. е. от угла сдвига фаз  $\Psi$  между током  $I$  в обмотке якоря и э. д. с.  $E_0$ , наводимой в этой обмотке. Рассмотрим влияние реакции якоря при различных видах нагрузки.

## § 28.2. Реакция якоря при активной нагрузке

Такая реакция якоря вызывается поперечным током  $I_q = I \cos \Psi$ , совпадающим по фазе с э. д. с.  $E_0$ . Предельный случай (рис. 28.3)  $I = I_q$ ,  $\Psi = 0$  может быть при чисто активной нагрузке, когда поле

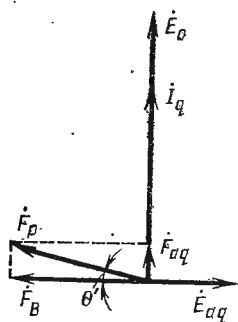


Рис. 28.3. Векторная диаграмма токов, э. д. с. и н. с. при активной нагрузке

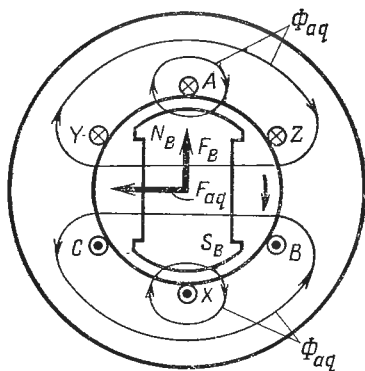


Рис. 28.4. Реакция якоря синхронного генератора при активной нагрузке

реакции якоря  $F_{aq}$  сдвинута относительно поля полюсов  $F_B$  на 90 эл. град.

На рис. 28.4 показаны пути замыкания потока реакции якоря для момента, когда поперечный ток в фазе  $AХ$  имеет максимальную величину, а в фазах  $ВУ$  и  $СZ$  — меньше максимальной. Так как  $I_q$  совпадает по фазе с  $E_0$ , то в рассматриваемый момент э. д. с., индуцированная при х. х. в фазе  $AХ$ , тоже должна иметь максимальную величину, а ротор занять положение, указанное на рисунке. Линии магнитной индукции поля якоря замыкаются попе-

рек полюсов, и магнитная ось поля якоря (направление  $\vec{F}_{aq}$ ) составляет угол в 90 эл. град. с осью полюсов (направление  $\vec{F}_B$ ), поэтому поле якоря и его н. с. называются *поперечными*. Поперечная реакция якоря усиливает магнитную индукцию под одной частью полюса и ослабляет ее под другой, изменяя распределение магнитной индукции в воздушном зазоре нагруженной машины. На векторной диаграмме (см. рис. 28.3) показаны векторы  $\vec{F}_B$  и  $\vec{F}_{aq}$ , а также результирующая н. с.

$$\vec{F}_p = \vec{F}_B + \vec{F}_{aq}. \quad (28.6)$$

Поперечная реакция якоря при активной нагрузке изменяет величину и фазу результирующей н. с. При ненасыщенной магнитной цепи пропорционально  $F_p$  изменяются поток и э. д. с.; последняя при этом станет равна геометрической сумме  $E_0$  и  $E_{aq}$ , т. е. по сравнению с холостым ходом э. д. с. возрастает. При насыщенной магнитной цепи поперечная реакция якоря повышает насыщение под одной половиной полюса, что увеличивает магнитное сопротивление и уменьшает магнитный поток обмотки возбуждения и индуктированную им э. д. с.  $E_0$ . В зависимости от степени насыщения материала магнитной цепи э. д. с.  $E$ , индуктированная результирующим потоком, может быть больше, равна или меньше э. д. с.  $E_0$ .

Зависимость между э. д. с.  $E_{aq}$ , индуктированной поперечным потоком реакции якоря  $F_{aq}$ , и поперечным током  $I_q$  удобно представить в следующем виде:

$$E_{aq} = -j I_q x_{aq}, \quad (28.7)$$

где  $x_{aq}$  — индуктивное сопротивление, обусловленное поперечным потоком реакции якоря.

Так как в поперечном направлении магнитная цепь всегда ненасыщена, то поток  $\Phi_{aq}$  практически не зависит от насыщения и  $x_{aq}$  можно считать величиной постоянной.

### § 28.3. Реакция якоря при индуктивной, реактивной и смешанной нагрузках

**Индуктивная нагрузка.** Такая реакция якоря вызывается продольным током  $I_d = I \sin \Psi$ , отстающим от э. д. с.  $E_0$  на  $\pi/2$ . Предельный случай (рис. 28.5)  $I = I_d$ ;  $\Psi = \pi/2$  может быть при чисто индуктивной нагрузке. На рис. 28.6 показаны пути замыкания потока реакции якоря для момента времени, когда продольный ток в фазе  $AХ$  имеет максимальную величину. Э. д. с., индуктированная в фазе  $AХ$  при х. х. машины, имеет максимум в тот момент, когда середина полюса  $N_B$  находится против проводника  $A$ , а середина полюса  $S_B$  — против проводника  $X$ . Так как ток  $I_d$  отстает от  $E_0$  на угол  $\Psi$ , то в рассматриваемый момент времени ротор должен быть смещен по направлению вращения на 90 эл. град. по отношению к положению, при котором э. д. с.  $E_0$  в фазе  $AХ$  имела наибольшую



величину. Как видно на рис. 28.6, линии магнитной индукции поля якоря замыкаются вдоль полюсов и магнитная ось составляет с магнитной осью поля обмотки возбуждения угол в 180 эл. град. Таким образом отстающий продольный ток  $I_d$  возбуждает продольное размагничивающее поле реакции якоря.

Из векторной диаграммы (см. рис. 28.5) следует, что с увеличением индуктивной нагрузки уменьшается продольная результирующая н. с.:

$$\dot{F}_d = \dot{F}_B - \dot{F}_{ad}. \quad (28.8)$$

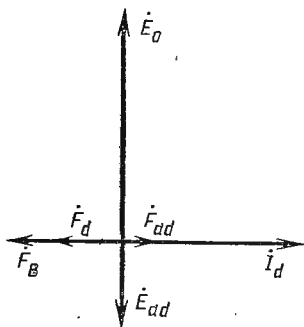


Рис. 28.5. Векторная диаграмма токов, э. д. с. и н. с. при индуктивной нагрузке

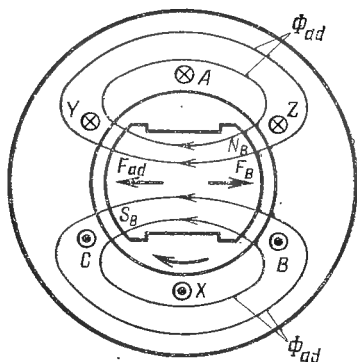


Рис. 28.6. Реакция якоря синхронного генератора при индуктивной нагрузке

Зависимость между э. д. с.  $E_{ad}$ , индуктированной продольным потоком реакции якоря  $\Phi_{ad}$ , и продольным током  $I_d$  можно представить в виде

$$\dot{E}_{ad} = -j \dot{I}_d x_{ad}, \quad (28.9)$$

где  $x_{ad}$  — индуктивное сопротивление, обусловленное продольным потоком реакции якоря.

Так как линии этого магнитного потока замыкаются вдоль магнитной цепи, то  $\Phi_{ad}$ ,  $E_{ad}$  и  $x_{ad}$  зависят от степени насыщения этой цепи. Следовательно, продольная реакция якоря при отстающем токе уменьшает результирующее магнитное поле и э. д. с., что понижает напряжение на зажимах генератора.

**Емкостная нагрузка.** Такая реакция якоря вызывается продольным током  $I_d = I \sin \Psi$ , опережающим э. д. с.  $E_0$ . Предельный случай (рис. 28.7)  $I = I_d$ ,  $\Psi = \pi/2$  может быть при чисто емкостной нагрузке. В данном случае поток реакции якоря будет продольным (см. рис. 28.6, где  $N_b$  и  $S_b$  поменяются местами и  $\dot{F}_B$  изменит направление на противоположное), но направлен согласно с потоком обмотки возбуждения и является продольно-намагничивающим.

Из векторной диаграммы, показанной на рис. 28.7, видно, что с увеличением емкостной нагрузки возрастут продольная результирующая н. с.

$$\dot{F}_d = \dot{F}_B + \dot{F}_{ad}, \quad (28.10)$$

магнитный поток, э. д. с. и напряжение генератора. Это следует учитывать при подключении больших емкостей, например разомкнутых длинных линий электропередач, что может вызвать значительные перенапряжения на зажимах генератора.

**Смешанная нагрузка.** Такая реакция якоря имеет место в общем случае, когда угол  $\Psi$  сдвига фаз между током статора  $I$  и э. д. с.  $E_0$  больше нуля, но меньше по абсолютному значению  $90^\circ$ . На

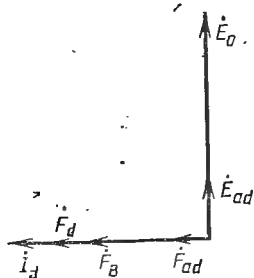


Рис. 28.7. Векторная диаграмма токов, э. д. с. и н. с. при емкостной нагрузке

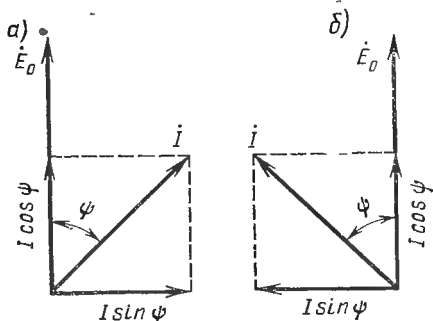


Рис. 28.8. Векторная диаграмма токов и э. д. с. при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

рис. 28.8, а показано расположение векторов тока  $I$  и э. д. с.  $E_0$  при активно-индуктивной нагрузке (угол  $\Psi > 0$ ), а на рис. 28.8, б — при активно-емкостной ( $\Psi < 0$ ). Ток можно разложить на две составляющие  $I \sin \Psi$  и  $I \cos \psi$  и рассматривать отдельно действие н. с., создаваемых каждой из этих составляющих. Таким образом намагничивающую силу  $F_a$  можно представить двумя составляющими: н. с. поперечной реакции якоря  $F_{aq} = F_a \cos \Psi$  и н. с. продольной реакции якоря  $F_{ad} = F_a \sin \Psi$ . При активно-индуктивной нагрузке, когда ток  $I$  отстает от  $E_0$ , реакция якоря будет размагничивающей, а при активно-емкостной нагрузке, когда ток  $I$  опережает  $E_0$ , реакция якоря будет намагничивающей.

#### § 28.4. Особенности реакции якоря в неявнополюсном генераторе

В неявнополюсных машинах (рис. 28.9) магнитное сопротивление одинаково по продольной и поперечной осям, так как в отличие от машин явнополюсных воздушный зазор сохраняет постоянную величину вдоль всей окружности якоря. Поэтому отпадает необходимость в раздельном учете продольной и поперечной реакции якоря. В рассматриваемых машинах кривая н. с. обмотки возбуждения

представляет собой трапецию (рис. 28.10), если пренебречь ступенчатостью в части, соответствующей пазам и зубцам ротора. Из разложения трапеции в ряд Фурье имеем  $F_{B1} = F_B/k_a$ , где  $F_{B1}$  — амплитуда первой гармоники;

$$k_a = \pi^2 \gamma / \left( 8 \sin \frac{\gamma \pi}{2} \right). \quad (28.11)$$

Значения  $k_a = f(\gamma)$ , где  $\gamma$  — отношение обмотанной части ко всему полюсному делению, приведены ниже:

|            |       |       |      |      |       |
|------------|-------|-------|------|------|-------|
| $\gamma$ : | 0,6   | 0,66  | 0,7  | 0,75 | 0,8   |
| $k_a$ :    | 0,918 | 0,943 | 0,97 | 1,0  | 1,035 |

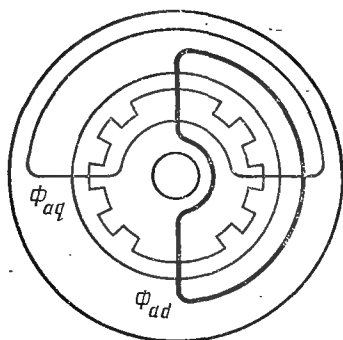


Рис. 28.9. Реакция якоря в неявнополюсном синхронном генераторе

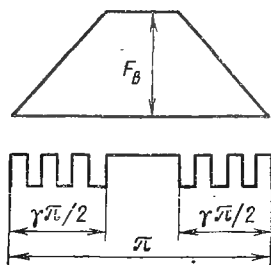


Рис. 28.10. Кривая н. с. обмотки возбуждения

Таким образом, для первой гармонической составляющей результирующая н. с.

$$\dot{F}_{p1} = \dot{F}_{B1} + \dot{F}_a = \dot{F}_B/k_a + \dot{F}_a,$$

или

$$\dot{F}_{p1} = (\dot{F}_B + k_a \dot{F}_a)/k_a = \dot{F}_p/k_a, \quad (28.12)$$

где  $\dot{F}_p = \dot{F}_B + k_a \dot{F}_a$  — результирующая н. с. машины, приведенная к форме кривой н. с. обмотки возбуждения.

## § 28.5. О моменте синхронной машины

Представим н. с. обмотки возбуждения и поперечную н. с. обмотки якоря двумя системами синхронно вращающихся постоянных магнитов соответственно  $N_B, S_B$  и  $N_{aq}, S_{aq}$  (рис. 28.11, а). Одноименные полюсы отталкиваются, а разноименные притягиваются, и силы взаимодействия полюсов имеют тангенциальную составляющую, которая стремится повернуть одну полюсную систему относительно другой, создавая момент синхронной машины: тормозной для генератора и вращающий для двигателя. Если под влиянием этого момента ротор вращается с частотой  $n_d$  в сторону, указан-

ную пунктирную стрелкой, то машина при этом работает в режиме двигателя. Если ротор приводится во вращение посторонним двигателем с частотой  $n_r = n_d = 60f/p$  в сторону, указанную сплошной стрелкой, то машина работает генератором, в котором рассмотренное взаимодействие полюсов создает тормозной момент.

Если произвести такую же замену постоянными магнитами н. с. машины с продольной реакцией якоря (рис. 28.11, б), то очевидно, что силы взаимодействия полюсов статора и ротора направлены радиально, и поэтому такая машина не развивает момента; здесь имеет место только размагничивание, а при противоположном знаке  $I_d$  — подмагничивание.

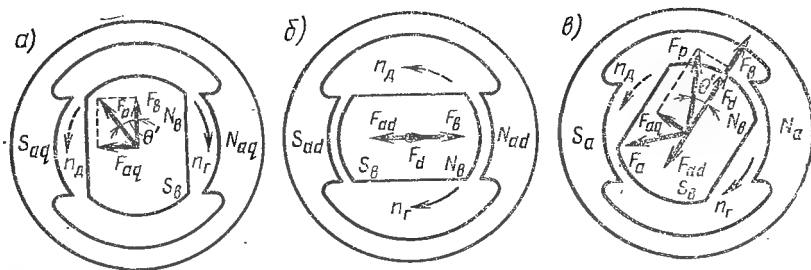


Рис. 28.11. Влияние поперечной, продольной и продольно-поперечной реакции якоря на момент синхронной машины

На рис. 28.11, в приведен общий случай, когда имеются продольная (размагничивающая)  $F_{ad}$  и поперечная  $F_{aq}$  реакции якоря. Результирующая продольная н. с. машины  $\vec{F}_d = \vec{F}_B - \vec{F}_{ad}$ , а результирующая н. с.  $\vec{F}_p = \vec{F}_d + \vec{F}_{aq}$ .

Угол  $\theta'$  между  $\vec{F}_p$  и  $\vec{F}_d$  или, что то же, между  $\vec{F}_p$  и  $\vec{F}_B$  является углом между осями результирующего поля и поля обмотки возбуждения. Чем больше угол  $\theta'$ , тем больше момент и активная мощность, развиваемая синхронной машиной. Угол  $\theta'$  не может быть больше 90 эл. град. (всегда  $\vec{F}_{ad} < \vec{F}_B$ ) и показывает, насколько сместилась ось результирующего магнитного поля при данной нагрузке по сравнению с тем положением, которое она занимала при х. х. генератора, когда совпадала с геометрической осью полюсов.

## Глава 29

### ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ Э.Д.С. СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Векторные диаграммы применяют при рассмотрении следующих вопросов: определение изменения напряжения при изменении нагрузки; расчет н. с. обмотки возбуждения при нагрузке, графическое построение характеристик, определение мощности машины, выявление условий параллельной работы. Чаще всего решается задача определения тока возбуждения (или соответствующей ве-

личины  $E_0$ ) при заданных  $U, I, \varphi$ ; иногда решают обратную задачу — определение  $U$  по заданным  $E_0, I, \Psi$ .

Векторные диаграммы рассматривают при условии симметричной нагрузки, так что достаточно взять одну фазу; для двух других диаграмма получается из первой поворотом на 120 и 240 эл. град. Для построения диаграмм необходимо знание ряда параметров, которые могут быть определены расчетным путем при проектировании машины и опытным путем при ее испытании.

## § 29.1. Основная диаграмма э. д. с. (диаграмма Блонделя)

Особенностью данной диаграммы для явнополюсного синхронного генератора с насыщенной магнитной цепью является раздельный учет продольной и поперечной реакции якоря, в чем нет надоб-

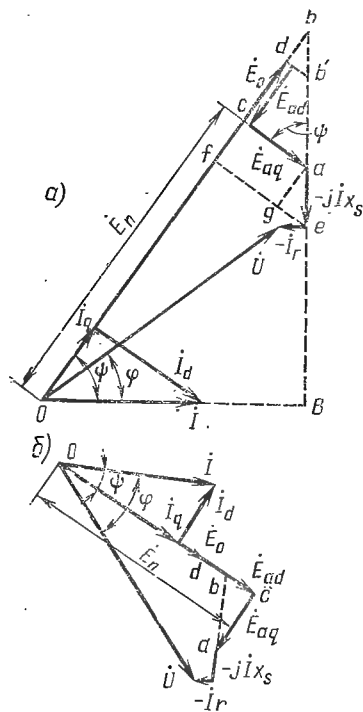


Рис. 29.1. Основные диаграммы э. д. с. при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках

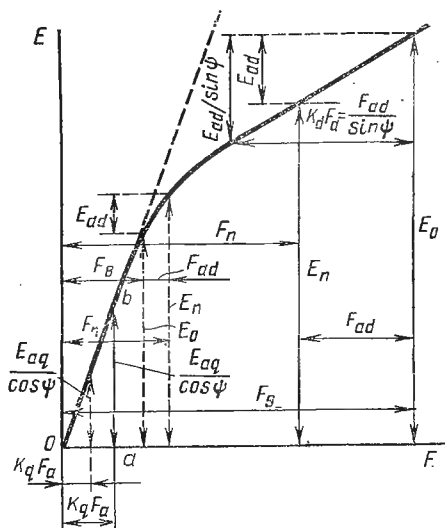


Рис. 29.2. Характеристика намагничивания (х. х. х.)

ности для неявнополюсной машины. На рис. 29.1, а изображена диаграмма при отстающем токе (активно-индуктивной нагрузке), а на рис. 29.1, б — при опережающем (активно-емкостной нагрузке). Вектор  $E_{aq}$  — э. д. с., индуцированная поперечным потоком

реакции якоря, отстает на  $\pi/2$  от поперечного тока  $I_q$ ;  $\dot{E}_{ad}$  — величина, на которую изменилась э. д. с., индуцированная продольным потоком вследствие реакции якоря, вызванной продольным током  $I_a$ . При отстающем токе  $\dot{E}_{ad}$  находится в противофазе с э. д. с.  $\dot{E}_0$ , а при опережающем токе  $\dot{E}_{ad}$  совпадает по фазе с  $\dot{E}_0$ ;  $\dot{E}_\pi$  — э. д. с., индуцированная продольным результирующим магнитным потоком генератора;  $\dot{E}_s = -jI x_s$  — э. д. с., индуцированная потоком рассеяния якоря  $\Phi_s$ . Для построения диаграммы необходимо знать величину отрезка  $ab$ , который определяет фазу  $\dot{E}_0$ . При определении считают, что магнитная цепь машины ненасыщена по поперечной оси, и поэтому отрезок  $ab$ , равный в масштабе э. д. с. величине  $E_{aq}/\cos \Psi$ , пропорционален  $F_{aq}/\cos \Psi$ ; величину  $F_{aq}/\cos \Psi = k_q F_a$  можем вычислить, не зная значения угла  $\Psi$ , затем, пользуясь характеристикой намагничивания [характеристикой холостого хода (х. х. х.) рис. 29.2] машины, определяем величину отрезка  $ab$ . Если известна величина  $x_{aq}$ , то длина отрезка  $ab$  может быть вычислена, как произведение  $I$  на  $x_{aq}$ , так как

$$E_{aq}/\cos \Psi = I_q x_{aq}/\cos \Psi = I x_{aq}. \quad (29.1)$$

Строят диаграмму в следующем порядке (см. рис. 29.1, а и б): известны величины  $r$ ,  $x_s$ , х. х. х.,  $F_a$ ,  $k_q$ ,  $k_d$ ; величинами  $U$ ,  $I$  и  $\varphi$  задаемся. Откладываем  $\dot{U}$ ,  $I$ ,  $I_r$  и  $jI x_s$  и доводим построение диаграммы до точки  $a$ . После этого по х. х. х. находим э. д. с.  $\dot{E}_{aq}/\cos \Psi$ , которая в масштабе напряжений дает отрезок  $ab$ . Проводим линию  $Ob$ , которая определяет фазу  $\dot{E}_0$ , после чего из точки  $a$  проводим вектор  $\dot{E}_{aq}$  под углом  $90^\circ$  к  $Ob$ , чем определяется продольная э. д. с.  $\dot{E}_\pi$ , а по х. х. х. и результирующая н. с. по продольной оси  $F_\pi$ . Вычисляем н. с. продольной реакции якоря  $F_{ad} = k_d F_a \sin \Psi$  и н. с. обмотки возбуждения  $F_b = F_\pi \pm F_{ad}$ , а затем по х. х. х. находим величины  $\dot{E}_0$  и  $\dot{E}_{ad}$ , нанесением которых на диаграмму заканчивается построение. На рис. 29.2 все сплошные линии относятся к диаграмме для отстающего тока (см. рис. 29.1, а), а пунктирные — для опережающего тока (см. рис. 29.1, б). Величины  $F_a$ ,  $k_q$ ,  $k_d$  известны только по расчетным данным и не могут быть определены опытным путем. При построении диаграммы по опытным данным вместо  $F_a$ ,  $k_q$  и  $k_d$  известны величина  $x_q$  и произведение  $k_d F_a$ , чего достаточно для вычисления  $ab$  и  $F_{ad}$ . Угол  $\Psi$  может быть определен из формулы

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Psi &= Bb/OB = (U \sin \varphi + I x_s + E_{aq}/\cos \Psi) / (U \cos \varphi + I r) = \\ &= (U \sin \Psi + I x_q) / (U \cos \varphi + I r), \end{aligned} \quad (29.2)$$

если известны все входящие сюда величины (рис. 29.1, а).

Диаграмма может быть построена и для ненасыщенной магнитной цепи, но тогда вместо х. х. х. надо взять ее прямолинейную часть и продолжение, которое показано на рис. 29.2 пунктирной линией.

Решение обратной задачи, т. е. нахождение  $U$  по заданной величине  $\dot{E}_0$ , возможно только приближенным путем. Отрезок  $ab'$ ,

равный  $E_{ad}/\sin \Psi$ , может быть приближенно вычислен без знания угла  $\Psi$  по величине  $k_d F_a$  и х. х. х., как показано на рис. 29.2 для индуктивной нагрузки. Определенная таким образом величина  $ab'$  тем ближе к истинной, чем ближе использованная часть х. х. х. к прямой линии, так как при прямолинейности этого участка становится справедливым равенство

$$E_{ad}/F_{ad} = (E_{ad}/\sin \Psi)'(F_{ad}/\sin \Psi) = (E_{ad}' \sin \Psi)'(k_d F_a). \quad (29.3)$$

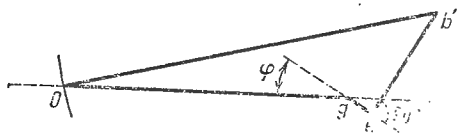


Рис. 29.3. Определение напряжения  $U$  при известной величине  $E_0$

Для построения диаграммы (рис. 29.3) проводим пунктирную линию  $og$  и через произвольно выбранную точку  $g$  под углом  $\varphi$  к ней проводим пунктирную линию  $ge$ . Откладываем отрезок  $ge$ , равный  $I_r$ , и отрезок  $eb' = I x_s + E_{ad}/\sin \Psi$ . Из точки  $b'$ , как из центра, проводим радиусом, равным известной величине  $E_0$ , дугу, пересечение которой с пунктирной линией  $og$  определяет точку  $o$ , а вместе с тем и отрезок  $og$ , который дает искомое напряжение  $U$ .

## § 29.2. Преобразованная диаграмма э. д. с.

Из диаграммы, показанной на рис. 29.1, а, можно получить следующие соотношения:

$$ef = eg + gf = I x_s \cos \Psi + E_{aq} = I_q x_s + I_q x_{aq} = I_q (x_s + x_{aq}) = I_q x_q, \quad (29.4)$$

где

$$x_q = x_s + x_{aq}. \quad (29.5)$$

называют *синхронным индуктивным сопротивлением по поперечной оси*:

$$fd = fc + cd = I x_s \sin \Psi + E_{ad} = I_d x_s + I_d x_{ad} = I_d (x_s + x_{ad}) = I_d x_d, \quad (29.6)$$

где  $x_d = x_s + x_{ad}$  называют *синхронным индуктивным сопротивлением по продольной оси*. На рис. 29.4 изображены соответствующие схемы замещения по поперечной и продольной осям машины. Из диаграммы, данной на рис. 29.1, а, можно написать, что

$$eb = ea + ab = I x_s + I x_{aq} = I x_q. \quad (29.7)$$

Для построения преобразованной диаграммы достаточно знать параметры  $r$ ,  $x_d$ ,  $x_q$ , которые легко определить опытным путем. Преобразованные диаграммы могут быть построены для насыщенной и ненасыщенной магнитной цепи в зависимости от режима, в котором была определена величина сопротивления  $x_d$ . На

рис. 29.5, *a* приведена диаграмма при отстающем токе (активно-индуктивной нагрузке), на рис. 29.5, *б* — при опережающем (активно-емкостной нагрузке), построение которых производится аналогично предыдущим диаграммам (см. рис. 29.1, *a* и *б*).

Решение обратной задачи, т. е. определение  $U$  по заданному значению  $E_0$ , достигается тем же методом, что и для диаграммы, изображенной на рис. 29.3. В качестве вектора  $E_0$  принимаем

Рис. 29.4. Схема замещения по поперечной (*a*) и продольной (*б*) осям машины

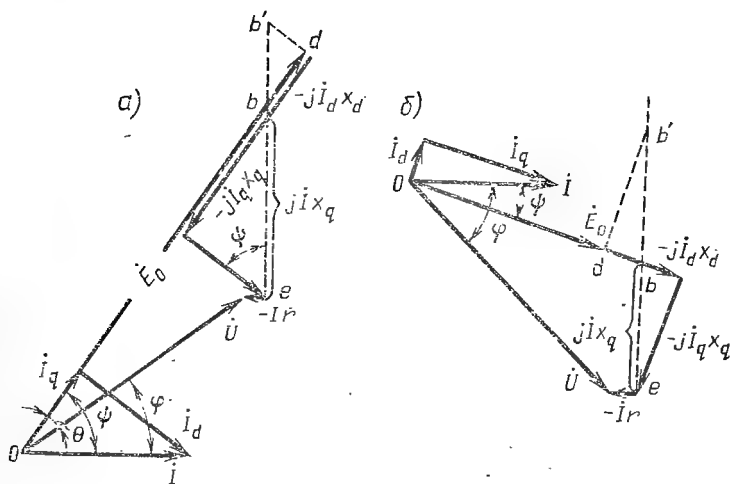
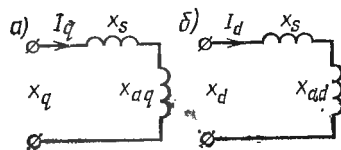


Рис. 29.5. Преобразованные диаграммы при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках

и здесь линию  $Ob'$ ; вместо действительной величины  $E_0$  — линию  $Od$  (рис. 29.5, *a*);  $ab'$  — перпендикуляр к  $Od$ . Полученные величины тем ближе к действительным, чем меньше угол  $b'Od$ ; отрезок  $eb' = I_d x_d / \sin \Psi = I x_d$ .

Активное падение напряжения  $Ir$  в большинстве случаев мало по сравнению с остальными составляющими напряжения; отрезок  $Ir$  превращается в точку и обычно на диаграмме не фигурирует, за исключением машин малой мощности.

### § 29.3. Упрощенная диаграмма э. д. с. и синхронное индуктивное сопротивление

Упрощенная диаграмма — частный случай основной диаграммы э. д. с. Для построения упрощенной диаграммы, кроме значения величин, характеризующих нагрузку машин, необходимо знать син-



хронное индуктивное сопротивление  $x_c = x_a + x_s$ , которое учитывает потоки рассеяния и реакции якоря.

Для неявнополюсного ненасыщенного генератора  $x_d = x_q$  и рассматривать каждый из этих параметров нет необходимости. Тогда синхронное индуктивное сопротивление

$$x_c = x_d = x_q \quad (29.8)$$

не является постоянным, так как поток реакции якоря зависит от насыщения, и поэтому при разных режимах работы  $x_c$  меняется и влияет на изменение напряжения.

Пользуясь индуктивным сопротивлением  $x_c$ , получаем э. д. с.:

$$\begin{aligned} E_d &= I_d x_d = I x_c \sin \Psi; \\ E_q &= I_q x_q = I x_c \cos \Psi. \end{aligned} \quad (29.9)$$

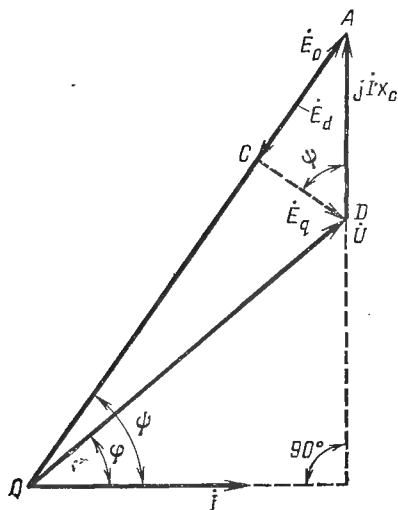


Рис. 29.6. Упрощенная диаграмма э. д. с.

На рис. 29.6 построена упрощенная диаграмма э. д. с. Векторы  $E_d$  и  $E_q$  представляют собой катеты прямоугольного треугольника  $ADC$ , гипотенуза которого  $AD = I x_c$ . Так как угол  $ADC = \Psi$ , то  $AD$  составляет прямой угол с вектором тока  $I$ . При известном  $x_c$  упрощенную диаграмму э. д. с. строят следующим образом. Под углом  $\varphi$  к вектору тока  $I$  проводят вектор напряжения  $\vec{U} = OD$ , а затем перпендикулярно вектору тока  $I$  — вектор  $DA = j I x_c$ . Пренебрегая активным падением напряжения, получим  $\vec{E}_0 = OA$  и  $\Delta U = \frac{E_0 - U}{U} 100\%$ . Упрощенная диаграмма э. д. с. дает возможность приближенно определить повышение напряжения при сбросе нагрузки в неявнополюсных ненасыщенных генераторах. В генераторах с насыщенной магнитной цепью при нагрузке проводимость по продольной оси уменьшается. Поэтому, если пользоваться ненасыщенным значением  $x_c$ , имеем завышенное значение  $E_0$ . Для получения практически удовлетворительных результатов при определении повышения напряжения следует пользоваться насыщенным значением  $x_c$ , определяемым по характеристике х. х. и индуктивной нагрузочной характеристике (построение которой будет рассмотрено ниже) для точки  $U = U_{\text{ном}}$ .

## § 29.4. Практическая диаграмма э. д. с.

Практическую диаграмму э. д. с. строят с помощью характеристик холостого хода (х. х.) и короткого замыкания (к. з.). Она дает возможность с достаточной для практики точностью определить

Строят характеристику х. х. (ОСР) и характеристику трехфазного к. з.  $OF$  (0А), показанную на рис. 29.7. По оси ординат откладывают вектор  $OA = \dot{U}_{\text{ном}}$  и под углом  $\varphi_{\text{ном}}$  к нему проводят линию тока  $I$ ; э. д. с.  $E_{0\text{ном}} = OB$ , индуцируемая в генераторе при токе возбуждения  $I_{B0}$ , представляет собой геометрическую сумму (если пренебречь за малостью активным сопротивлением якоря) вектора  $OA = \dot{U}_{\text{ном}}$  и вектора падения напряжения в индуктивном состоянии рассеяния  $AB = jI_{\text{ном}}x_s$ . Последний опережает вектор тока  $I$  на  $90^\circ$ . Затем описывают из точки  $O$  дугу радиусом  $OB$  до пересечения с осью ординат (точка  $b$ ) и сносят ее в точку  $C$  на характеристику х. х. Тогда отрезок  $OD$  определит собой ток возбуждения при х. х.  $I_{B0}$ , необходимый для создания э. д. с.  $E_{0\text{ном}} = DC$ .

Для учета действия реакции якоря поступают следующим образом. Для тока  $I_K = I_{\text{ном}} = FG$  находят по характеристике к. з. ток возбуждения  $I_{\text{в.з.}} = OG$  и вычитают из него ток  $I_{\text{в.з.}}$ , необходимый для

создания э. д. с.  $E_s = I_{\text{ном}} x_s = KL = AB$ . Тогда отрезок  $LG$  определяет собой ток  $I_{\text{в.я}}$ , соответствующий реакции якоря. Чтобы получить полный ток возбуждения  $I_{\text{в.ном}}$ , нужно геометрически сложить отрезки  $OD = I_{\text{в0}}$  и  $DM = LG = I_{\text{в.я}}$ . Угол  $CDM$ , под которым  $DM$  проводится к прямой  $OB = E_{0\text{ном}}$ , равен углу между вектором тока  $I$  и э. д. с.  $E_{0\text{ном}}$ , т. е.  $\varphi_{\text{ном}} + \gamma$ . Описав из точки  $O$  радиусом  $OM$  дугу до пересечения с осью абсцисс в точке  $H$ , получают ток возбуждения  $I_{\text{в.ном}} = OH$ . При сбросе нагрузки такой ток создает э. д. с.  $E_0 = HP$ , соответственно чему

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\% = \frac{HP - OA}{OA} 100\%.$$

Так как для построения диаграммы используют н. с., непосредственно действующие в машине, то этим самым учитывают изменяющееся насыщение стали.

## § 29.5. Система относительных единиц

В теории синхронных машин широко применяют систему относительных единиц, в которой все величины выражают в долях единицы или в процентах. Одно из важнейших преимуществ такой системы — возможность производить сравнения параметров машин различных типов и мощностей. В качестве базовых величин принимают номинальные, которые считают равными единице: за единицу сопротивления для обмотки якоря принимают величину  $Z_{\text{ном}} = U_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}$ . Напряжение и ток в долях единицы представляют собой отношение действительных напряжения и тока к номинальным. Обозначая долевые значения параметров со звездочкой, получим напряжение  $U^* = U/U_{\text{ном}}$ ; ток  $I^* = I/I_{\text{ном}}$ ; сопротивление  $r^* = I_{\text{ном}}/U_{\text{ном}}$ ;  $x_s^* = I_{\text{ном}} x_s/U_{\text{ном}}$ ;  $x_d^* = I_{\text{ном}} x_d/U_{\text{ном}}$ ;  $x_d^* = I_{\text{ном}} x_d/U_{\text{ном}}$ ; мощность  $P^* = P/P_{\text{ном}}$ ; момент  $M^* = M/M_{\text{ном}}$  и другие величины.

## Глава 30

### ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

При исследовании синхронных машин пользуются их характеристиками, т. е. кривыми, определяющими зависимости между величинами, характеризующими рабочие свойства машины. Характеристики синхронного генератора, снимаемые при постоянной частоте вращения ( $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$ ), соответствующей номинальной  $f$ , дают возможность определить опытным путем параметры и судить о важнейших свойствах машины. Характеристики могут быть сняты опытным путем или построены графически. На рис. 30.1 показана схема для снятия характеристик.

## § 30.1. Характеристики холостого хода

Характеристика холостого хода (х. х. х.) является основной характеристикой, так как дает возможность выявить важные свойства машины (ее используют для построения других характеристик).

Она представляет собой зависимость  $E_0 = f(I_B)$  при  $f = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$  и  $I = 0$ , где  $I_B$  — ток возбуждения. Для регулирования тока возбуждения служит регулировочный реостат  $R_p$  (рис. 30.1), напряжение между разными фазами измеряется с помощью вольтметра  $V$ , включаемого через переключатель  $\Pi$ .

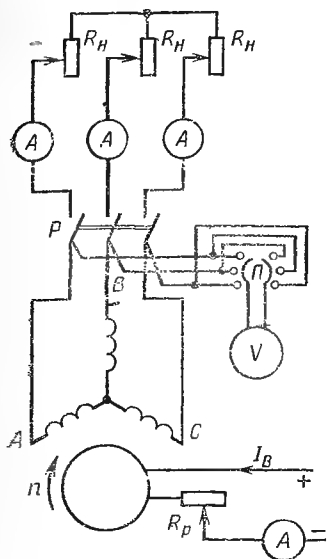


Рис. 30.1. Схема для снятия характеристик синхронного генератора

На рис. 30.2 изображена х. х., снятая опытным путем и выраженная в относительных единицах при изменении  $I_B$  от нуля до максимально допустимого значения, — восходящая ветвь и от

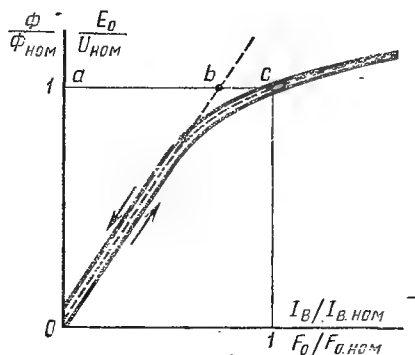


Рис. 30.2. Характеристика х. х. (намагничивания)

максимального значения до нуля — нисходящая ветвь. Расхождение между ветвями, обусловленное гистерезисом, невелико (3—4% от  $U_{\text{ном}}$ ). В качестве расчетной характеристики принимают пунктирную линию, проведенную посередине между ветвями. Магнитную цепь машины можно оценить по х. х., продолжив ее прямолинейную часть и проведя горизонтальную линию интересующего нас режима работы, например при  $E_0 = U_{\text{ном}}$ . Наклон прямолинейной части х. х. определяется магнитным напряжением воздушного зазора, а отклонение от прямой линии обусловлено насыщением магнитной цепи. Таким образом, отношение  $bc/ac$  может характеризовать степень насыщения магнитной цепи.

На рис. 30.3 приведена нормальная характеристика, выраженная в относительных единицах:

|                                  |      |     |      |     |
|----------------------------------|------|-----|------|-----|
| $I_B/I_{B,\text{ном}}$ . . . . . | 0,5  | 1,0 | 1,5  | 2,0 |
| $E_0/U_{\text{ном}}$ . . . . .   | 0,53 | 1,0 | 1,23 | 1,3 |

Эту характеристику получили на основе обобщения опыта электромашиностроения для явнополюсных синхронных машин средней и большей мощности. При проектировании генератора его

х. х. с. сравнивают с нормальной, причем желательнее получить как можно меньшее расхождение характеристик; несовпадение прямой части указывает на неправильный выбор воздушного зазора.

**Внешняя характеристика.** Представляет собой зависимость  $U=f(I)$  при  $n=n_{\text{ном}}=\text{const}$ ,  $I_B=\text{const}$  и  $\cos \varphi=\text{const}$ . Обычно  $\cos \varphi_{\text{ном}}=0,8$ , но генераторы большой мощности проектируются для работы при  $\cos \varphi_{\text{ном}}=0,85 \div 0,90$ .

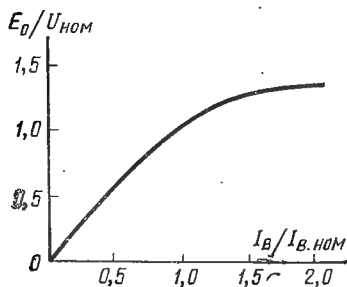


Рис. 30.3. Нормальная характеристика х. х.

Внешняя характеристика имеет большое практическое значение — по ней можно судить о том, как изменяется напряжение на зажимах генератора при изменении его нагрузки и отсутствии регулирования напряжения (в естественных условиях работы машины).

В зависимости от установки тока возбуждения различают два метода снятия (рис. 30.4) внешних характеристик. Метод понижения (сброса) нагрузки (рис. 30.4, а), при котором ток возбуждения устанавливают для номинального режима, т. е.  $I_B$  берут такой величины, что при заданном характере

нагрузки  $\cos \varphi$  и  $I=I_{\text{ном}}$  напряжение генератора было бы равно  $U_{\text{ном}}$ . После этого, не изменяя величины  $I_B$ , постепенно уменьшают  $I$ , давая ему ряд значений от  $I_{\text{ном}}$  до нуля. По этой характеристике

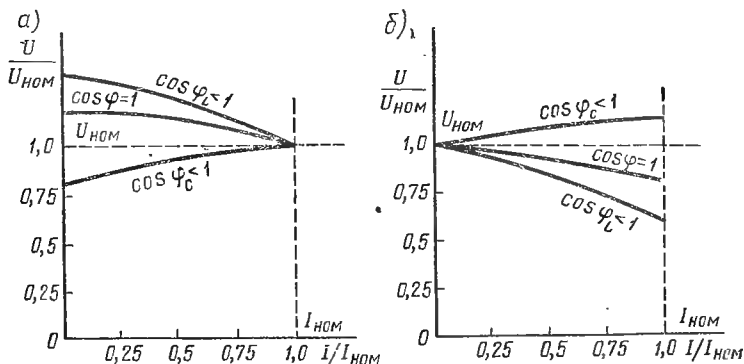


Рис. 30.4. Внешние характеристики, снятые методом повышения (а) и понижения (б) напряжения

определяют процентное изменение напряжения при данном  $\cos \varphi$ :

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\%,$$

где  $U_0=E_0$  — напряжение х. х.

Метод повышения нагрузки (рис. 30.4, б), при котором ток возбуждения  $I_B$  устанавливают такой величины, чтобы напряжение холостого хода машины было равно  $U_{\text{ном}}$ ; после этого току  $I$  дают ряд значений от 0 до  $I_{\text{ном}}$ , сохраняя постоянными  $I_B$  и  $\cos \varphi$ .

Напряжение на зажимах машины изменяется вследствие изменения активного падения напряжения  $Ir$ , индуктивного  $Ix_s$  и, главным образом, реакции якоря. Наиболее резкое уменьшение напряжения с увеличением тока  $I$  имеет место при индуктивной нагрузке, когда реакция якоря — продольная размагничивающая. При емко-

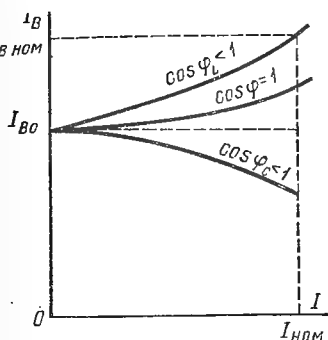


Рис. 30.5. Регулировочные характеристики

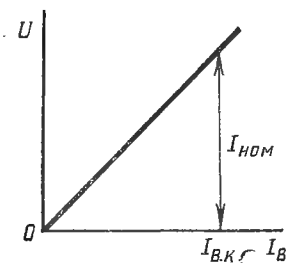


Рис. 30.6. Характеристика трехфазного к. з.

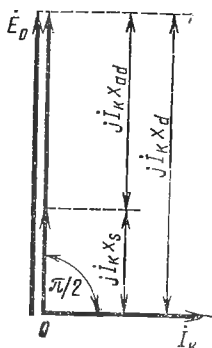


Рис. 30.7. Векторная диаграмма э. д. с. при к. з.

стой нагрузке продольная реакция якоря — намагничивающая, и поэтому с ростом опережающего тока напряжение машины увеличивается, а  $\Delta U$  становится величиной отрицательной.

**Регулировочная характеристика.** Представляет собой зависимость  $I_B = f(I)$  при  $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ ,  $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$  и  $\cos \varphi = \text{const}$  и показывает, как нужно изменять ток возбуждения  $I_B$ , когда изменяется  $I$ , чтобы при данном  $\cos \varphi$  напряжение  $U$  оставалось постоянным. Примерный вид регулировочных характеристик при различных характерах нагрузки  $\cos \varphi$  приведен на рис. 30.5. Регулировочные характеристики используют для выбора и проектирования регуляторов напряжения, регулирующей аппаратуры и приборов.

**Характеристика трехфазного короткого замыкания.** Х. к. з. представляет собой зависимость  $I = I_K = f(I_B)$  при  $U = 0$  и  $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$ . Опыт трехфазного к. з. производится по схеме, представленной на рис. 30.1, при замкнутом рубильнике  $P$  и полностью выведенных сопротивлениях нагрузки  $R_H$ . Так как активное сопротивление обмотки мало по сравнению с индуктивным, то можно считать, что ток отстает от э. д. с. на угол  $\pi/2$  и является продольным током. Вследствие большой размагничивающей реакции якоря магнитная цепь машины насыщена и х. к. з. представляет собой прямую линию, как показано на рис. 30.6, где через  $I_{\text{в.к.}}$  обозначен ток возбуждения, для которого ток к. з. равен номинальному, а векторная

диаграмма будет иметь вид, представленный на рис. 30.7. Ток к. з.  $I_K = E_0/x_d$ .

**Нагрузочная характеристика.** Представляет собой зависимость  $U=f(I_B)$  при  $I=\text{const}$ ,  $n=n_{\text{ном}}=\text{const}$  и  $\cos \varphi=\text{const}$ . Примерный вид нагрузочных характеристик изображен на рис. 30.8. Х. х. х.

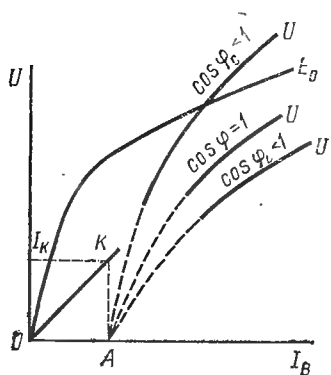


Рис. 30.8. Нагрузочные характеристики

также является как бы одной из нагрузочных, так как снимается при постоянном значении тока  $I=0$ . Все нагрузочные характеристики, снятые для одного значения тока  $I$ , но при разных величинах  $\varphi$ , сходятся в одной точке  $A$ . Пунктиром показаны части кривых, которые не удастся снять опытным путем. Так как для точки  $A$  напряжение  $U=0$ , то эта точка является началом х. к. з. и ее можно определить, найдя на х. к. з. (линии  $OK$ ) величину тока  $I$  (отрезок  $AK$ ), при котором снимались нагрузочные характеристики. Эти характеристики используют для графического построения других характеристик и опытного определения параметров. Особое значение имеет индуктивная нагрузочная характеристика, которую снимают при чисто индуктивной нагрузке ( $\cos \varphi=0$ ).

нагрузочная характеристика, которую снимают при чисто индуктивной нагрузке ( $\cos \varphi=0$ ).

## § 30.2. Параметры генератора

**Определение ненасыщенного значения  $x_d$ .** Для получения ненасыщенного значения продольного синхронного индуктивного сопротивления  $x_d$  используют диаграмму, представленную на рис. 30.7, из которой следует, что  $E_0 = I_K x_{ad} + I_K x_s = I_K x_d$ , откуда

$$x_d = x_{ad} + x_s = E_0 / I_K. \quad (30.1)$$

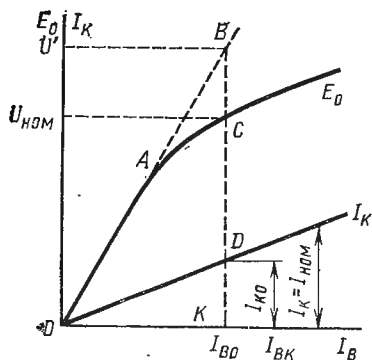


Рис. 30.9. Характеристики х. х. и к. з., построенные для определения ненасыщенного значения  $x_d$

Э. д. с.  $E_0$  определяют по х. х. х. при заданном значении  $I_B$ , а ток  $I_K$  по х. к. з. (рис. 30.9). При к. з. сталь машины ненасыщена, поэтому при больших токах к. з. пользуются спрямленной частью х. х. х., показанной пунктиром  $AB$ . Для тока возбуждения  $I_{B0}=OK$ ,  $U'=KB$ , а не  $KC$  по действительной х. х. х. и  $I_{K0}=KD$ . Тогда

$$x_d = U' / I_{K0} = KB / KD, \quad (30.2)$$

полученное по спрямленной х. х. х. и к. з., называют *ненасыщенным*. Это один из важных параметров машины.

**Отношение короткого замыкания (о. к. з.).** О. к. з. — расчетная величина, дающая возможность судить о ряде свойств машины, например, об устойчивости работы генератора параллельно с сетью и габаритах машины. Так как при токе возбуждения  $I_{в0}$  (рис. 30.9) напряжение на х. х. равно номинальному ( $E_0 = U_{ном}$ ), а  $I_{к0}$  — установившийся ток трехфазного к. з. при токе возбуждения  $I_{в0}$ , то

$$\text{о. к. з.} = I_{к0} / I_{ном}. \quad (30.3)$$

Если через  $I_{в.к}$  обозначим ток возбуждения, при котором  $I_{к} = I_{ном}$ , то

$$\text{о. к. з.} = I_{в0} / I_{в.к}. \quad (30.4)$$

Можно установить связь о. к. з. с другими параметрами машины, воспользовавшись соотношениями для ненасыщенной магнитной цепи:

$$I_{к0} = U' / x_d = U' U_{ном} I_{ном} / (U_{ном} x_d I_{ном}). \quad (30.5)$$

Обозначим  $U' / U_{ном} = c$  — коэффициент, характеризующий насыщение, и помня, что  $x_d I_{ном} / U_{ном} = x_d^*$ , получим о. к. з.  $I_{к0} / I_{ном} = c / x_d^*$ . Следовательно, о. к. з. тем больше, чем больше насыщение магнитной цепи и чем меньше  $x_d^*$ . Индуктивное сопротивление обратно пропорционально сопротивлению магнитной цепи, т. е. величине воздушного зазора  $\delta$ , и поэтому для увеличения о. к. з. необходимо увеличивать  $\delta$ , что ведет к удорожанию машины.

При индивидуальной работе генератора увеличение о. к. з. ведет к уменьшению потока якоря при заданной н. с. обмотки якоря, следовательно, уменьшает величину  $\Delta U\%$ .

**Определение насыщенного значения  $x_d$ ,  $x_c$ .** По характеристикам х. х. и к. з. (рис. 30.10) можно определить  $x_d$  или  $x_c$  как отношение  $E_0 / I_{к}$ , причем  $E_0$  и  $I_{к}$  должны быть взяты для одного и того же значения тока возбуждения  $I_{в}$ . Пока обе характеристики прямолинейны, значение  $x_d$  остается величиной постоянной, как показано на участке  $DD_1$ . По мере насыщения магнитной цепи величина  $x_d$  уменьшается (участок  $D_1D_2$ ), и определенное таким образом  $x_d$  или  $x_c$  имеет смысл только для насыщения, при котором оно определено.

Знание индуктивного сопротивления рассеяния обмотки якоря  $x_s$  позволяет найти величину продольной размагничивающей реакции якоря (отрезок  $AB$ ) при данном токе к. з. (отрезок  $AK$ ); при этом величину  $I x_s$  измеряют отрезком  $BC$ . Так как при к. з. результирующая н. с.  $F_p$  равна арифметической разности  $F_{в}$  и  $F_{ад}$  (или  $F_{в}$  и  $F_{а'}$ ), а э. д. с., индуцированная результирующим потоком, равна э. д. с. рассеяния, то, зная  $x_s$  (следовательно, и величину  $BC$ ), мы можем определить реакцию якоря — отрезок  $AB$ . И наоборот, зная  $AB$ , можем определить  $BC$ , а по нему  $x_s$ . Треугольник  $ABC$  называют *реактивным (характеристическим)* треугольником. Так как катеты треугольника пропорциональны  $I$ , то гипоте-





стика. Затем для интересующего нас напряжения (обычно  $U_{\text{ном}}$ ) определяют точку  $A_1$  на нагрузочной характеристике. Проведя отрезок  $0_1A_1$ , равный и параллельный отрезку  $0A$ , и отрезок  $0_1C_1$  параллельно начальной прямолинейной части х. х.  $0C$ , определяют положение точки  $C_1$ , после чего проводят горизонтальную линию  $C_1B_1'$ . Из сопоставления с рис. 30.11 видно, что  $A_1B_1' = Ix_s$ , а  $B_1'C_1 = Ix_{ad}$ . Поделив значения  $Ix_s$  и  $Ix_{ad}$ , выраженные в вольтах, на величину тока  $I$  (в амперах), при котором снималась нагрузочная характеристика, получим величины  $x_s$  и  $x_{ad}$  (в омах). Найденная величина  $x_{ad}$  справедлива только при данном насыщении.

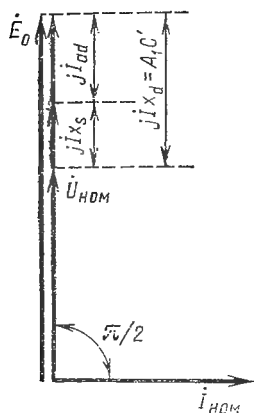


Рис. 30.12. Векторная диаграмма э. д. с. для определения ненасыщенного значения  $x_d$

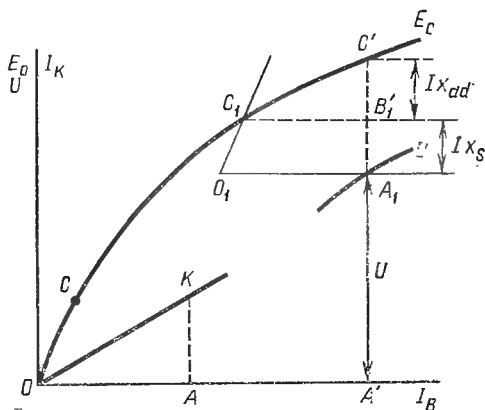


Рис. 30.13. Определение  $x_s$  и  $x_{ad}$  с помощью характеристик х. х., к. з. и индуктивной нагрузочной характеристики

В слабонасыщенных неявнополюсных машинах магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям можно считать практически равными:  $x_{aq} \approx x_{ad}$  и  $x_q \approx x_d$ . В слабонасыщенных явнополюсных машинах  $x_{aq} < x_{ad}$  и  $x_q < x_d$  ( $x_q \approx 0,6x_d$ ), причем под  $x_d$  понимают его ненасыщенное значение.

### § 30.3. Потери и к. п. д. синхронного генератора

Синхронная машина имеет ряд потерь.

1. Общие механические потери, которые складываются из потерь на трение в подшипниках, на трение щеток о коллектор или контактные кольца, на трение вращающихся частей о воздух или другой применяемый для охлаждения газ и вентиляционных потерь. Расчет этих потерь связан с большими трудностями и на заводах обычно пользуются опытными данными, полученными при испытаниях построенных машин. Расчетные формулы в основном эмпирические. В качестве примера приведем формулу, применяе-

ую заводом «Электросила» для определения общих механических потерь (кВт) явнополюсной синхронной машины:

$$P_{\text{мех}} = 0,82p \left( \frac{v}{40} \right)^3 \sqrt{\frac{l_1}{19}}, \quad (30.7)$$

где  $p$  — число пар полюсов;  $v$  — окружная скорость ротора, м/с;  $l_1$  — полная длина статора, см.

2. Основные магнитные потери в стали на гистерезис и вихревые токи в ярме и зубцах статора, а также в поверхностном слое полюсных наконечников определяются аналогично потерям в стали в машинах постоянного тока (гл. 8).

3. Основные электрические потери (кВт) в обмотке якоря, пропорциональные квадрату тока фазы якоря  $I_\phi$ :

$$P_{\text{э.я}} = m I_\phi^2 r_{75} 10^{-3}, \quad (30.8)$$

где  $m$  — число фаз;  $r_{75}$  — сопротивление фазы обмотки при  $75^\circ \text{C}$ .

4. Основные электрические потери (кВт) в обмотке возбуждения и в регулирующей аппаратуре включают в себя потери в возбудителе и подвозбудителе, если они находятся на одном валу с синхронной машиной.

При отсутствии возбудителя

$$P_{\text{э.в}} = (I_{\text{в}}^2 r_{\text{в}75} + 2\Delta U_{\text{щ}} I_{\text{в}}) 10^{-3}, \quad (30.9)$$

при наличии возбудителя

$$P_{\text{э.в}} = \frac{I_{\text{в}}^2 r_{\text{в}75} + 2\Delta U_{\text{щ}} I_{\text{в}}}{\eta_{\text{в}}} 10^{-3}. \quad (30.10)$$

Для возбудителя малой мощности  $\eta_{\text{в}} = 0,7 \div 0,8$ .

5. Добавочные потери  $P_{\text{доб}}$  обусловлены вихревыми токами, индуктированными потоками рассеяния, потоками высших гармоник в обмотках и металлических массивных частях машины, и потерями, связанными с зубчатостью статора и ротора в неявнополюсных машинах. Точный расчет добавочных потерь связан с большими трудностями.

Согласно ГОСТ 11826—66 добавочные потери в синхронных машинах до 100 кВ·А учитываются в размере 0,5% от номинальной мощности при работе машины в режиме генератора и в размере 0,5% подводимой мощности при работе в режиме двигателя. В машинах мощностью больше 100 кВ·А рекомендуется определять добавочные потери на основе опытных данных.

Обозначим сумму потерь через  $\Sigma P$ , полезную мощность через  $P_2$ , тогда потребляемая мощность  $P_1 = P_2 + \Sigma P$ .

Коэффициент полезного действия синхронной машины для генераторов

$$\begin{aligned} \eta_{\text{г}} &= P_{2\text{г}} / P_{1\text{г}} = m U_\phi I_\phi \cos \varphi / (m U_\phi I_\phi \cos \varphi + \Sigma P) = \\ &= 1 - \Sigma P / (m U_\phi I_\phi \cos \varphi + \Sigma P); \end{aligned} \quad (30.11)$$

для двигателей

$$\eta_d = P_{2\Gamma} / P_{1\Gamma} = (mU_\phi I_\phi \cos \varphi - \sum P) / (mU_\phi I_\phi \cos \varphi) = 1 - \sum P_i / (mU_\phi I_\phi \cos \varphi). \quad (30.12)$$

## Глава 31

### ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

На современных электрических станциях устанавливают несколько синхронных генераторов, предназначенных для параллельной работы. При переменном графике нагрузки целесообразно включать на параллельную работу или отключать отдельные машины с таким расчетом, чтобы каждая из них работала с номинальной или близкой к ней нагрузкой, при которой к. п. д. и другие показатели генераторов и первичных двигателей имеют наибольшую величину. Параллельная работа генераторов и объединение электростанций для параллельной работы увеличивают надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей и позволяет иметь меньшую резервную мощность. Для правильного подключения синхронного генератора к сети необходимо выполнить ряд условий, чтобы не была нарушена нормальная работа сети и потребителей.

#### § 31.1. Включение на параллельную работу

Включение на параллельную работу может быть осуществлено двумя способами: способом точной синхронизации и способом самосинхронизации, который в последнее время нашел наибольшее применение.

**Способ точной синхронизации.** Такое название получил способ, при котором к сети подключают предварительно возбужденную машину при условии, что  $e_{r0} = u_c$ . Допустим, что генератор подключается к  $n$  параллельно работающим генераторам. При неблагоприятных условиях включения в контуре, состоящем из параллельно работающих генераторов и подключаемого генератора, появится ток, вызванный суммарной величиной  $e_{r0} + u_c$ . В этом случае ток включения может достигнуть опасной величины и вызвать аварию. Во избежание возникновения большого тока при подключении машины необходимо, чтобы  $e_{r0}$  и  $u_c$  были равны по величине и противоположны по знаку, частота  $f_r = f_c$ , а следовательно,  $\omega_r = \omega_c$  и порядок следования фаз генератора и сети должен быть одинаковым. Это достигается изменением тока возбуждения генератора и регулированием частоты его вращения.

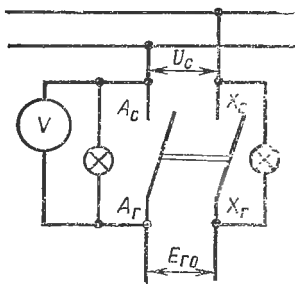


Рис. 31.1. Схема включения однофазного генератора в сеть при помощи лампы на потухание

Определяют момент включения рубильника (момент синхронизации) при помощи лампового синхроскопа. На рис. 31.1 показана схема включения однофазного генератора, которую называют *включением на потухание*. Так как активное сопротивление ламп во много раз больше остальных сопротивлений контура, образованного обмотками якорей подключаемого и работающих генераторов и соединительных проводов, то можно считать, что ток в лампах совпадает по фазе с суммой  $e_{г0} + u_c$ . Если  $E_{г0} = U_c$ , но  $\omega_r \neq \omega_c$ , то оба вектора  $\dot{E}_{г0}$  и  $\dot{U}_c$  будут вращаться с различной угловой скоростью

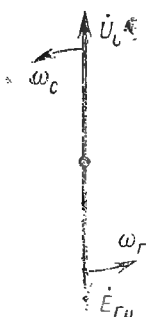


Рис. 31.2. Векторная диаграмма напряжений сети  $U_c$  и э. д. с. генератора  $E_{г0}$

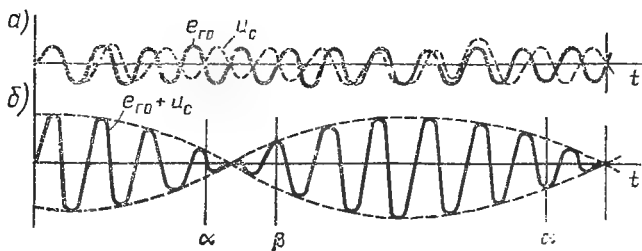


Рис. 31.3. Биение напряжений:  
а — изменение напряжения сети и генератора; б — кривая результирующего напряжения

стью и лампы будут то загораться, то гаснуть. В момент, когда оба вектора расположатся, как показано на рис. 31.2, то лампы погаснут (момент времени, когда сумма  $\dot{E}_{г0} + \dot{U}_c = 0$ ). Напряжение, приложенное в этот момент к лампам, равно нулю.

На рис. 31.3, а показано изменение напряжения сети (кривая  $u_c = f(t)$ ) и изменение э. д. с. генератора (кривая  $e_{г0} = f(t)$ ). Сложив ординаты обеих кривых, получим кривую  $u_c + e_{г0} = f(t)$  (рис. 31.3, б) изменения напряжения на лампах. Напряжение сети и э. д. с. генератора в результате неравенства частот то уравниваются друг друга, то складываются, т. е. происходит биение напряжений. Здесь промежуток времени от  $\alpha$  до  $\beta$  соответствует потуханию ламп, а промежуток времени от  $\beta$  до  $\alpha'$  — горению ламп. Регулируя частоту вращения подключаемого генератора, добиваются, чтобы этот промежуток времени был достаточно велик ( $3 \div 5$  с), и включают в середине темного промежутка. Для более точного определения момента замыкания рубильника параллельно одной из ламп подключают нулевой вольтметр, прохождение стрелки которого через нуль будет показывать момент, когда нужно замкнуть рубильник.

Для включения на параллельную работу трехфазного генератора кроме указанных выше условий необходимо еще иметь соот-

На рис. 31.4, а изображена схема включения трехфазного генератора на потухание ламп. Лампы будут одновременно гаснуть и загораться, если порядки чередования фаз сети и генератора совпадают. Подключение к сети осуществляется так же, как и однофазного генератора.

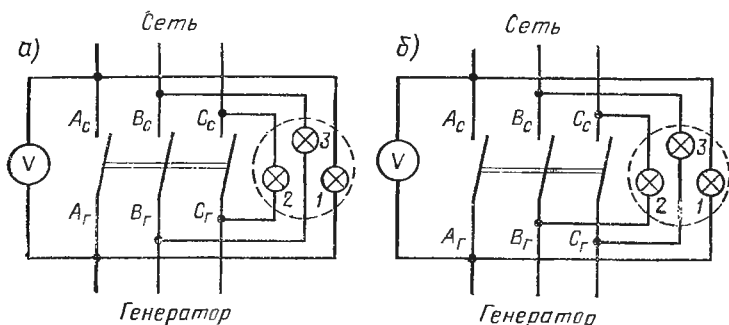


Рис. 31.4. Схема включения трехфазного генератора в сеть при помощи ламп по способам на потухание (а) и вращение (б) света

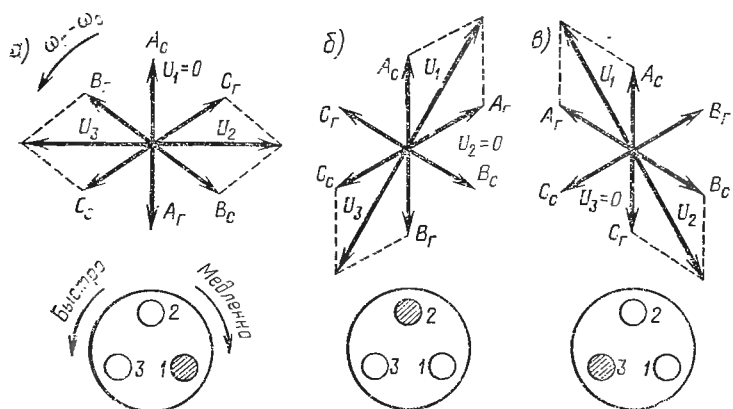


Рис. 31.5. Очередность загорания и потухания ламп при включении их по схеме на вращение света

На рис. 31.4, б показана схема включения трехфазного генератора на вращение света, отличающаяся от предыдущей тем, что если одна лампа 1 присоединена к зажимам одной и той же фазы  $A_c$  и  $A_r$ , то лампа 2 присоединена к зажимам  $B_c$  и  $C_r$ , а лампа 3 — к зажимам  $C_c$  и  $B_r$ .

Очередность загорания и потухания ламп иллюстрируется на рис. 31.5, где через  $A_c$ ,  $B_c$ ,  $C_c$  обозначены векторы фазных напря-

жений сети  $U_c$ , которые считаем неподвижными, а через  $A_r, B_r, C_r$  — векторы фазных э. д. с. генератора  $E_{r0}$ , которые перемещаются против часовой стрелки со скоростью, соответствующей  $\omega_r - \omega_c$  при  $\omega_r > \omega_c$ . Считаем, что  $E_{r0} = U_c$ .

На рис. 31.5, а показан момент, когда векторы  $E_{r0}$  и  $U_c$  находятся в противофазе и лампа 1 гаснет ( $U_1 = 0$ ), а лампы 2 и 3 горят с одинаковым накалом, соответствующим линейному напряжению  $U_2 = U_3 = \sqrt{3}U_c$ . Для упрощения построения выбираем следующий момент (рис. 31.5, б) так, чтобы векторы  $A_r, B_r, C_r$  повернулись на угол  $\alpha = 2\pi/3$  относительно первого положения; при этом  $U_2 = 0$ ,  $U_1 = U_3 = \sqrt{3}U_c$ .

На рис. 31.5, в показан момент, когда  $U_3 = 0$ , а  $U_1 = U_2 = \sqrt{3}U_c$ . Очевидно, что при выбранном расположении ламп и  $\omega_r > \omega_c$  (надпись «Быстро») вращение света происходит против часовой стрелки, а при  $\omega_r < \omega_c$  (надпись «Медленно») — по часовой стрелке. Достоинство этого метода заключается в том, что он указывает, надо ли увеличивать или уменьшать частоту вращения генератора. Закрытие рубильника должно производиться в момент (см. рис. 31.5, а), когда лампа 1 погасла, две другие горят с одинаковым накалом, а стрелка вольтметра проходит через нуль.

Если собрана схема на потухание, а получается вращение света, то это указывает, что предполагаемый нами порядок следования фаз не соответствует действительному и нужно поменять местами провода, подключенные к зажимам  $B_r$  и  $C_r$  или к зажимам  $B_c$  и  $C_c$ . Если после замены получается схема, которую мы предполагаем получить, то порядок следования фаз правильный. В схемах на потухание и на вращение света следует выбирать лампы на двойное напряжение сети (при  $E_{r0} = U_c$ ,  $U_c + E_{r0} = 2U_c$ ) или включить две лампы последовательно. Шкала вольтметра также должна быть на двойное фазное напряжение сети.

Таким образом для подключения синхронного генератора к сети методом точной синхронизации необходимо:

- 1) привести генератор во вращение с частотой, близкой к синхронной;
- 2) возбудить генератор и установить напряжение, близкое к напряжению сети;
- 3) проверить порядок следования фаз и собрать схему лампового синхроскопа на потухание или на вращение света;
- 4) регулируя частоту вращения и возбуждение подключаемого генератора, получить достаточно медленные загорания и потухания ламп или вращение света.

После выполнения этих условий в нужный момент включают рубильник; если при этом появляются значительные колебания, машину надо немедленно отключить и тщательно проверить правильность условий включения. Несоблюдение условий, требуемых точной синхронизации включения, может привести к тяжелым последствиям. Поэтому для осуществления точной синхронизации с помощью ручных устройств необходим высококвалифицированный

персонал. Длительность включения в обычных условиях  $2\div 3$  мин, а в аварийных условиях при резких и длительных колебаниях частоты и напряжения сети это время доходит до 20 мин. Недостатки способа точной синхронизации особенно выявились при решении вопросов, связанных с работой автоматизированных электростанций и установок, где необходимо обеспечить надежное и быстрое включение синхронных машин на параллельную работу.

**Способ самосинхронизации.** Сущность его заключается в том, что генератор, приведенный во вращение с частотой, близкой к синхронной, подключают к сети невозбужденным, и только после этого дают полное возбуждение и генератор сам втягивается в синхронизм под действием синхронизирующего момента. Основные преимущества этого метода следующие: он прост и не требует дополнительной аппаратуры; время включения значительно меньше, чем при точной синхронизации; наибольший бросок тока меньше наибольшего броска тока при включении в неблагоприятный момент по методу точной синхронизации. При включении генератора по методу самосинхронизации результирующая э. д. с. равна напряжению сети (так как  $E_{r0}=0$ ), и очевидно, что в этом случае бросок тока не может превзойти величины ударного тока, на который рассчитана машина.

Таким образом, для подключения синхронного генератора к сети методом самосинхронизации необходимо:

- 1) привести генератор во вращение с частотой, близкой к синхронной: скольжение для больших машин  $S < (2\div 3)\%$ , для малых  $S < (5\div 6)\%$ ;
- 2) проверить правильность чередования фаз;
- 3) определить положение реостатов и автоматических устройств, установленных в цепи возбуждения для регулирования напряжения, в которое они должны быть установлены сразу после подключения генератора к сети. После подключения обмотки якоря к сети подключить цепь возбуждения и произвести ее настройку.

Подключение по методу самосинхронизации может осуществляться как ручным способом, так и при помощи автоматических устройств.

## § 31.2. Электромагнитная мощность

Для более подробного изучения свойств синхронной машины, работающей параллельно с сетью большой мощности, определим, от чего зависит ее электромагнитная мощность.

Электромагнитная мощность генератора равна сумме полезной мощности  $P_2 = mUI \cos \varphi$ , отдаваемой во внешнюю цепь, и электрических потерь в меди обмотки статора  $P_{в.я} = mI^2 r$ , т. е.

$$P_{\text{эм}} = P_2 + P_{\text{в.я}} = mUI \cos \varphi + mI^2 r. \quad (31.1)$$

Электромагнитная мощность получается в результате преобразования части механической мощности, подведенной к валу генератора и передаваемой через воздушный зазор на статор электро-



магнитным путем. Другая часть этой механической мощности расходуется на механические и магнитные потери.

Так как потери в обмотке якоря  $P_{\text{я.я}}$  относительно малы (в машинах средней мощности  $P_{\text{я.я}} < 1\%$ ), то обычно  $P_{\text{эм}} \approx P_2$ , тогда

$$P_{\text{эм}} \approx mUI \cos \varphi. \quad (31.2)$$

По известной величине  $P_{\text{эм}}$  легко вычислить электромагнитный момент, развиваемый машиной:

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / \Omega_c, \quad (31.3)$$

где  $\Omega_c$  — угловая синхронная частота вращения ротора.

Электромагнитная мощность неявнополюсного генератора. Из диаграммы, показанной на рис. 31.6, найдем отрезок  $AB = Ix_c \cos \varphi = E_0 \sin \theta$ , откуда

$$I \cos \varphi = (E_0 / x_c) \sin \theta. \quad (31.4)$$

Подставив (31.4) в (31.2), получим

$$P_{\text{эм}} = mU (E_0 / x_c) \sin \theta, \quad (31.5)$$

и, соответственно,

$$M_{\text{эм}} = mU (E_0 / x_c) \sin \theta, \quad (31.6)$$

из которого следует, что при заданных величинах  $E_0$  и  $U$  мощность машины определяется углом  $\theta$  между вектором э. д. с. холостого хода —  $\dot{E}_0$  и вектором напряжения  $\dot{U}$  при данной нагрузке.

На рис. 31.7 показана кривая зависимости  $P_{\text{эм}}$  или  $M_{\text{эм}}$  от угла  $\theta$  при  $U = \text{const}$  и  $E_0 = \text{const}$ , которую называют *угловой характеристикой*. Такие условия имеют

место при параллельной работе генератора с сетью, у которой  $U = \text{const}$ , и при постоянном токе возбуждения. Угловая характеристика представляет собой синусоиду, амплитуда которой

$$P_{\text{эм max}} = mU (E_0 / x_c) = mUI_k, \quad (31.7)$$

где  $I_k = E_0 / x_c$  — установившийся ток трехфазного к. з. при данном токе возбуждения.

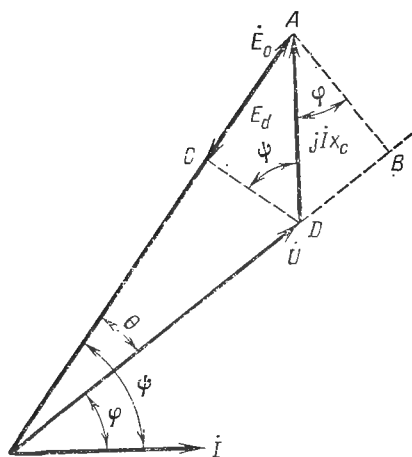


Рис. 31.6. Векторная диаграмма э. д. с. для определения  $P_{\text{эм}}$  неявнополюсного синхронного генератора

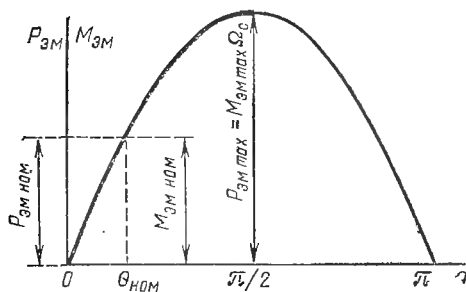


Рис. 31.7. Угловая характеристика неявнополюсного генератора

На рисунке через  $P_{\text{эм.ном}}$  обозначена номинальная мощность и соответствующий ей угол  $\theta_{\text{ном}}$  при заданных  $U$  и  $E_0$ . Отношение  $P_{\text{эм.мах}}/P_{\text{эм.ном}}$  характеризует перегрузочную способность машины. При параллельной работе часть характеристики, начерченная тонкой линией, где  $\pi/2 < \theta < \pi$ , является областью неустойчивой работы.

**Электромагнитная мощность явнополюсного генератора.** Пользуясь выражением (31.2) и преобразованной диаграммой, показанной на рис. 29.6, можно написать, что для явнополюсного генератора электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = mUI \cos \varphi = mUI \cos (\Psi - \theta) = mUI_q \cos \theta + mUI_d \sin \theta. \quad (31.8)$$

Из диаграммы имеем  $I_q = U \sin \theta / x_q$  и  $I_d = (E_0 - U \cos \theta) / x_d$ . Подставив эти выражения в (31.8), получим  $P_{\text{эм}} = mU(E_0/x_d) \sin \theta + mU^2(1/x_q - 1/x_d) \sin \theta \cos \theta$ , после преобразований

$$P_{\text{эм}} = mU(E_0/x_d) \sin \theta + m0,5U^2(1/x_q - 1/x_d) \sin 2\theta. \quad (31.9)$$

Для неявнополюсной машины, у которой  $x_q = x_d$ , второе слагаемое обращается в нуль.

Для явнополюсной машины второе слагаемое, которое обозначим через

$$P_{\text{эм.р}} = 0,5mU^2(1/x_q - 1/x_d) \sin 2\theta, \quad (31.10)$$

называют **реактивной мощностью**.

Разделив на синхронную угловую скорость, получим уравнение реактивного момента

$$M_{\text{эм.р}} = \frac{mU^2}{2\Omega_c} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (31.11)$$

### § 31.3. Параллельная работа генератора с сетью бесконечно большой мощности

После правильного включения машины ток в обмотке якоря равен нулю, так как вектор э. д. с. генератора  $\vec{E}_{\text{г0}}$  равен по величине и противоположен по направлению вектору напряжения сети ( $\vec{E}_{\text{г0}} = \vec{U}_{\text{г}} = -\vec{U}_{\text{с}}$ ); активная мощность  $P = mUI \cos \varphi = 0$  и реактивная мощность  $Q = mUI \sin \varphi = 0$ , т. е. машина работает вхолостую — не потребляет и не отдает никакой мощности.

Рассмотрим параллельную работу генератора с сетью бесконечно большой мощности, у которой напряжение  $U_{\text{с}} = \text{const}$  и частота  $f = \text{const}$ .

**Параллельная работа при изменении вращающего момента первичного двигателя и  $I_{\text{в}} = \text{const}$ .** Если увеличить мощность первичного двигателя, а следовательно, и вращающий момент  $M_1$ , то вращение ротора синхронной машины ускорится и вектор  $\vec{E}_{\text{г0}}$  несколько сдвинется в сторону вращения векторов (рис. 31.8, а). В этом случае в цепи будет действовать результирующая э. д. с.  $\Delta \vec{E}$ , которая создаст ток  $I$  в обмотке якоря. Так как сопротивлением остальных машин вследствие их большой мощности можно пренебречь,

то ток  $I$  зависит, в основном, от сопротивления  $x_c$  подключаемой машины (случай, когда  $x_c = x_d = x_q$ ). Активным сопротивлением обмотки якоря из-за малости пренебрегаем, тогда ток  $I$  отстает от  $\Delta \dot{E}$  на угол  $\pi/2$  и  $\Delta \dot{E} = \dot{U}_c + \dot{E}_{r0} = jI x_c$ .

При данном положении вектора  $\dot{E}_{r0}$  машина будет работать генератором и отдавать в сеть активную мощность  $P_2 = mUI \cos \varphi$ , развивать электромагнитную  $P_{эм} = mU_c (E_{r0}/x_c) \sin \theta > 0$  и тормозной момент  $M_{эм} = P_{эм}/\Omega_c$ .

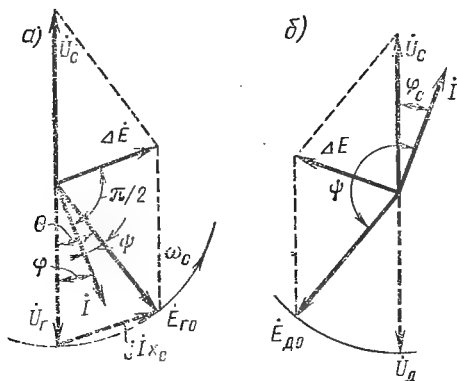


Рис. 31.8. Векторные диаграммы э. д. с. при параллельной работе генератора с сетью:

$a - P_{эм} > 0$ ;  $b - P_{эм} < 0$

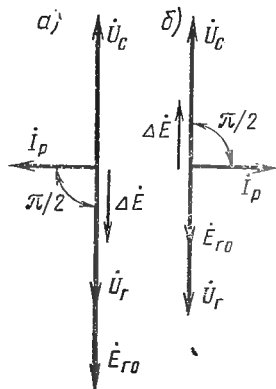


Рис. 31.9. Векторные диаграммы э. д. с. при параллельной работе генератора с сетью:

$a - \dot{E}_{r0} > \dot{U}_c$ ;  $b - \dot{E}_{r0} < \dot{U}_c$

Если уменьшить мощность первичного двигателя или совсем отключить его, то уменьшится частота вращения ротора и создастся положение, иллюстрируемое рис. 31.8, б, когда  $P_{эм} < 0$  и машина начнет потреблять энергию из сети, перейдя в режим работы двигателя. Из сказанного видно, что, изменяя вращающий момент первичного двигателя, можно регулировать активную мощность генератора, отдаваемую в сеть, и переводить его в режим двигателя.

**Параллельная работа при изменении тока возбуждения и  $M_{эм} = \text{const}$ .** Допустим, что после подключения генератора на параллельную работу с сетью бесконечно большой мощности он работает вхолостую и его э. д. с. уравнивается напряжением сети  $\dot{E}_{r0} = -\dot{U}_c$ . Если увеличить ток возбуждения, сделав  $\dot{E}_{r0} > \dot{U}_c$  (рис. 31.9, а), или уменьшить ток возбуждения, сделав  $\dot{E}_{r0} < \dot{U}_c$  (рис. 31.9, б), то в цепи обмоток якоря параллельно работающих машин будет действовать э. д. с.  $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{r0} + \dot{U}_c$ , вызывающая появление реактивного (уравнительного) тока  $I_p$ . При увеличении  $I_b$  ток  $I_p$  является для генератора отстающим и вызывает продольную размагничивающую реакцию якоря. Для сети ток  $I_p$  является опережающим и создает для остальных параллельно подключенных генераторов продольную намагничивающую реакцию якоря.

1


$$\text{HHH } \dot{I}_R$$

Так как  $P_{\text{эм}} = mU(E_0/x_c) \sin \theta = \text{const}$  и  $U_r = U_c = \text{const}$ , то  $E_0 \sin \theta = \text{const}$  и при изменении тока возбуждения концы векторов э. д. с. будут скользить по горизонтальной пунктирной линии, проведенной через конец вектора  $\dot{E}_0$ . При увеличении тока возбуждения величина э. д. с. и ее фаза должны изменяться таким образом, чтобы  $E_0' \sin \theta' = E_0 \sin \theta$ , так как мощность  $P_{\text{эм}}$  осталась неизменной. В результате увеличения э. д. с. падение напряжения в обмотке якоря станет равным величине  $jI'x_c = \dot{E}_0' - \dot{U}_r$ , зная которую можно отложить вектор тока  $I'$ . Так как активным сопротивлением обмотки якоря пренебрегаем, то ток  $I'$  будет отставать от  $jI'x_c$  на угол  $\pi/2$ ; так как  $P = \text{const}$ , то при  $U_r = \text{const}$  активная составляю-

щая тока  $I_a$  также будет постоянной, и ток  $I'$  может отличаться от тока  $I = I_a$  только реактивной составляющей  $I_p'$ . Следовательно, при изменении тока возбуждения конец вектора тока обмотки якоря перемещается по вертикальной пунктирной линии, проведенной через конец вектора тока  $I_a$ , соответствующего данной величине  $P = P_{эм} = \text{const}$ . Для другой величины  $P_{эм}$  будут другие пунктирные горизонтальные и вертикальные линии. Ток  $I_p'$  является отстающим по отношению к генератору и опережающим по отношению

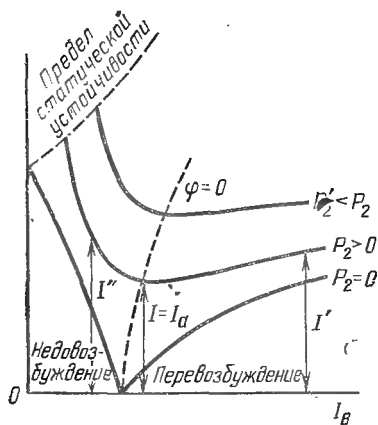


Рис. 31.11. У-образные характеристики при параллельной работе генератора с сетью

к сети. Уменьшение тока возбуждения, когда э. д. с. генератора становится, например, равной  $E_0''$ , вызовет появление реактивного тока  $I_p''$ , являющегося опережающим по отношению к генератору и отстающим по отношению к сети. Следовательно, изменение тока возбуждения вызовет лишь изменение реактивной составляющей тока в обмотке якоря, т. е. коэффициента мощности генератора.

Зависимость тока в обмотке якоря от тока возбуждения  $I = f(I_b)$  при  $U_c = \text{const}$  и  $P_2 = P_{эм} = \text{const}$  может быть построена либо на основе векторной диаграммы, либо опытным путем. Кривые для различных величин  $P_2$ , приведенные на рис. 31.11, называют U-образными кривыми.

Отсюда видно, что для каждой мощности существует такое возбуждение, при котором ток в обмотке якоря будет минимальным и равным активной составляющей тока  $I = I_a$ , эти точки соответствуют углу  $\varphi = 0$ . Пунктирная линия  $\varphi = 0$  отклоняется вправо, так как при увеличении тока статора увеличиваются поток реакции якоря и поток рассеяния. Для неизменности фазных сдвигов ( $\varphi = 0$ ) в машине нужны постоянные магнитные условия. Поэтому для компенсации потоков реакции якоря и рассеяния при увеличении нагрузки надо увеличить поток полюсов.

**Параллельная работа двух соизмеримых по мощности генераторов и перевод нагрузки.** При параллельной работе двух соизмеримых по мощности генераторов токи возбуждения обоих генераторов должны регулироваться одновременно, так, чтобы напряжение оставалось постоянным и потери в якорных обмотках были бы близки к минимальным, т. е.  $\cos \varphi$  отдельных генераторов должен быть равен  $\cos \varphi_n$  нагрузки. Чтобы осуществить перевод нагрузки с одного генератора на другой, нужно одновременно увеличить момент первичного двигателя нагружаемого генератора и уменьшить момент первичного двигателя разгружаемого генератора. Для постоянства  $\cos \varphi$  вместе с этим надо увеличить ток возбуждения первого генератора и уменьшить ток возбуждения второго.

### § 31.4. Устойчивость и колебания генератора при параллельной работе

**Статическая устойчивость. Синхронизирующая мощность. Перегрузочная способность.** Под *статической устойчивостью* понимают способность агрегата (первичный двигатель с генератором) самостоятельно восстановить исходный режим работы при небольших отклонениях от состояния равновесия. При работе генератора параллельно с сетью большой мощности напряжение постоянно, и при неизменном токе возбуждения электромагнитная мощность  $P_{эм} = mU(E_0/x_c) \sin \theta$  зависит только от угла  $\theta$ . На рис. 31.12 представлена зависимость  $P_{эм} = f(\theta)$  для неявнополюсного генератора, которую называют *угловой характеристикой*. При помощи этой характеристики можно более подробно рассмотреть работу синхронной машины параллельно с сетью, имея в виду ее устойчивость, т. е. способность держаться в синхронизме.

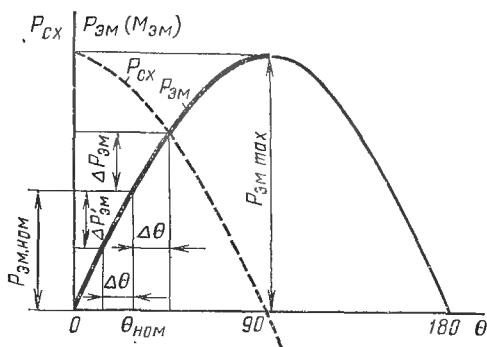


Рис. 31.12. Зависимости  $P_{эм}$ ,  $M_{эм}$  и  $P_{сх}$  от угла  $\theta$

Допустим, что генератор работает при номинальной нагрузке  $P_{эм.ном}$ . Если электромагнитный (тормозной) момент генератора  $M_{эм.ном}$  уравновешивает вращающий момент первичного двигателя  $M_1$ , то ротор генератора вращается с равномерной частотой и угол  $\theta = \theta_{ном}$ . Если вращающий момент  $M_1$  возрастет на малую величину, а затем спадет до прежней величины, то ротор, получив ускорение, сместится несколько вперед: угол между осями результирующего поля и полюсов при этом сделается равным  $\theta_{ном} + \Delta\theta$ , увеличив электромагнитную мощность и тормозной момент генератора. В этом случае возникает избыточный тормозной момент  $\Delta P'_{эм}/\Omega_c$ , который замедляет вращение ротора, и угол  $\theta$  начинает уменьшаться.

Равновесие между  $M_{эм}$  и  $M_1$  наступает не сразу. Вследствие инерции вращающихся частей угол  $\theta$ , уменьшаясь, станет меньше угла  $\theta_{ном}$ , при котором моменты равны. В этом случае тормозной момент генератора будет меньше вращающего момента двигателя. Разность между ними  $\Delta P'_{эм}/\Omega_c$  (избыточный вращающий момент) вызовет ускорение ротора и увеличение угла  $\theta$  до величины  $\theta_{ном}$ .

Таким образом возникают колебания угла  $\theta$  около значения  $\theta_{ном}$  или, что то же, колебания угловой частоты ротора около синхронной угловой частоты  $\Omega_c$ . Эти колебания быстро затухают благодаря тормозящему действию токов, возникающих в замкнутых цепях ротора, так как он вращается при колебаниях то быстрее, то медленнее поля.

В пределах изменения угла  $\theta$  от 0 до  $90^\circ$  (жирно начерченная часть синусоиды на рис. 31.12) работа генератора при малых отклонениях угла  $\theta$  будет устойчивой. При  $\theta = 90^\circ$  электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм макс}} = mUE_0'x_c \quad (31.12)$$

достигает максимального значения, а следовательно, момент

$$M_{\text{эм макс}} = \frac{mU}{\Omega_c} \cdot \frac{E_0}{x_c} \quad (31.13)$$

Электромагнитная мощность  $P_{\text{эм макс}}$  является пределом статической устойчивости. При дальнейшем увеличении мощности машина выпадает из синхронизма. Первую производную от электромагнитной мощности по углу  $\theta$  характеризует мощность

$$P_{\text{сх}} = \frac{dP_{\text{эм}}}{d\theta} = mU \cdot \frac{E_0}{x_c} \cos \theta, \quad (31.14)$$

которая удерживает машину в синхронизме и называется *удельной синхронизирующей мощностью*. Величину

$$M_{\text{сх}} = P_{\text{сх}} / \Omega_c \quad (31.15)$$

называют *удельным синхронизирующим моментом*.

Кривая  $P_{\text{сх}} = f(\theta)$  показана на рис. 31.12 пунктирной линией. Кривая имеет большую величину при малых значениях угла  $\theta$ , а при угле  $\theta > 90^\circ$  величина  $P_{\text{сх}}$  становится отрицательной и машина не может удерживаться в синхронизме. Обычно машина работает далеко от предела устойчивости. Угол  $\theta_{\text{ном}}$  при номинальной мощности не превышает  $20-30^\circ$ .

Если обозначим через  $P_{\text{эм ном}}$  и  $M_{\text{эм ном}}$  мощность и момент при номинальном режиме, то коэффициент статической перегружаемости  $k_{\text{пер}}$  характеризует перегрузочную способность и статическую устойчивость машины:

$$k_{\text{пер}} = P_{\text{эм макс}} / P_{\text{эм ном}} = M_{\text{эм макс}} / M_{\text{эм ном}} = 1 / \sin \theta_{\text{ном}} \quad (31.16)$$

При изготовлении машины можно повысить  $k_{\text{пер}}$  увеличением воздушного зазора  $\delta$ , так как при этом уменьшится  $x_c$  (увеличится отношение к. з.). Это вызывает увеличение амплитуды угловой характеристики и, следовательно, уменьшение угла  $\theta$  при заданном режиме. При эксплуатации машины можно воздействовать на  $k_{\text{пер}}$  изменением тока возбуждения. Однако оба эти способа имеют существенные недостатки. В первом случае увеличиваются размеры машины, а во втором за счет увеличения тока возбуждения в генераторе появится реактивный ток, что заставляет во избежание перегрева машины недогружать генератор активной мощностью. В связи с этим выбирают  $k_{\text{пер}} = 2 \div 2,5$ , что соответствует  $20 \div 30$  эл. град.

**Динамическая устойчивость.** Динамическая устойчивость синхронной машины определяется ее способностью работать синхронно при резких изменениях нагрузки. Предельный случай внезапного изменения нагрузки — короткое замыкание в сети. Резкое

изменение режима работы вызывает изменение угловой частоты машины с чередованием ускорения и торможения. Если энергия, запасенная при ускорении ротора, больше энергии, возвращаемой при торможении, то система динамически неустойчива, и машина выпадает из синхронизма. Для повышения динамической устойчивости применяют быстродействующее возбуждение, при котором ток возбуждения нарастает с большой скоростью до достаточно большой величины и устойчивость повышается вследствие увеличения э. д. с. обмотки якоря. Поэтому к современным системам возбуждения предъявляют высокие требования в отношении скорости нарастания тока возбуждения (форсировка возбуждения).

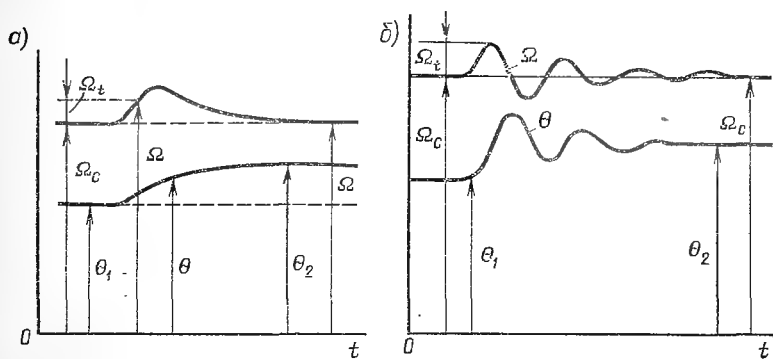


Рис. 31.13. Аперiodический (а) и колебательный (б) характер изменения угла  $\theta$

**Колебания при параллельной работе.** При всяком изменении нагрузки генератора, работающего параллельно с сетью, или изменении мощности его первичного двигателя происходит изменение угла  $\theta$  между  $\vec{U}$  и  $\vec{E}_0$ , например, от начальной величины  $\theta_1$  до конечной  $\theta_2$ . В частном случае могут быть кратковременные колебания нагрузки или мощности первичного двигателя вследствие каких-либо случайных причин, после устранения которых опять может восстановиться прежний режим при прежнем значении угла  $\theta$ . При изменении режима работы возникают избыточные моменты — инерционный и синхронизирующий. В зависимости от величины и соотношения параметров системы установление нового режима может происходить либо аперiodически (рис. 31.13, а), либо как бывает в большинстве случаев, процесс изменения угла от  $\theta_1$  до  $\theta_2$  носит колебательный характер (рис. 31.13, б). В этом случае угловая частота, изменяясь, принимает значения больше и меньше синхронной частоты  $\Omega_c$ . Такие колебания называют *собственными* или *свободными*.

Если генератор приводится во вращение поршневой машиной (паровые машины, дизели), вращающий момент которых периодически меняется по величине за один оборот вала, то возникают вы-



нужденные колебания ротора. Особенно опасен тот случай, когда период вынужденных колебаний становится близок к периоду свободных колебаний, так как при этом может наступить резонанс колебаний, при котором качания резко усиливаются, и параллельная работа становится невозможной.

## Глава 32

### РАБОТА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ ДВИГАТЕЛЯ И КОМПЕНСАТОРА

#### § 32.1. Синхронный двигатель

**Принцип действия трехфазного двигателя.** Если трехфазную обмотку якоря питать от сети переменного тока, то она будет возбуждать магнитное поле, вращающееся с частотой  $n$  (рис. 32.1). Обмотка возбуждения питается постоянным током и обычно расположена на роторе, частота которого  $n_{\text{рот}}$ . На рис. 32.1, а показаны н. с. обмотки возбуждения  $\vec{F}_в$ , обмотки якоря  $\vec{F}_я$  и результирующая  $\vec{F}_р$  для явнополюсной машины. Угол  $\theta'$ , на который смещается вектор  $\vec{F}_р$  относительно вектора  $\vec{F}_в$ , характеризует мощность и вращающий момент двигателя.

В генераторном режиме  $\vec{F}_р$  смещается против направления вращения ротора, в двигательном — по направлению вращения. Принцип действия синхронного двигателя удобно представить как результат взаимодействия двух магнитных систем — статора  $N_a, S_a$

и ротора  $N_B, S_B$  (рис. 32.1, б). Разложим н. с. якоря на продольную и поперечную составляющие аналогично тому, как это было сделано для генератора.

Продольное поле якоря (рис. 32.1, в), которое возбуждается продольным током, может только усиливать или ослаблять магнитное поле машины по продольной оси, не образуя вращающего момента, так как силы взаимодействия между  $S_B$  и  $N_{ad}$  и между  $N_B$  и  $S_{ad}$  имеют только радиальную составляющую.

Поперечное поле якоря (рис. 32.1, г), которое возбуждается поперечным током, стремится повер-

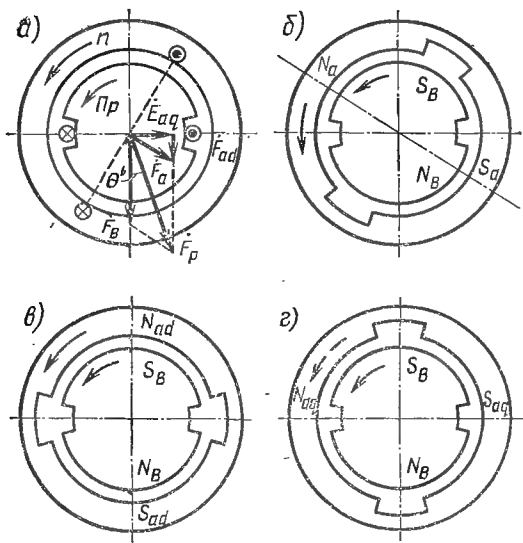


Рис. 32.1. Схемы, поясняющие принцип действия синхронного двигателя

нуть полную систему ротора, создавая, таким образом, вращающий момент, развиваемый двигателем. Силы взаимодействия между  $S_B$  и  $N_{aq}$  и между  $N_B$  и  $S_{aq}$  имеют тангенциальную составляющую, направленную по касательной к окружности ротора, создавая вращающий момент двигателя и стремясь повернуть ротор так, чтобы полюс  $S_B$  стал против  $N_{aq}$  и  $N_B$  — против  $S_{aq}$ . Поперечная составляющая н. с. определяет при заданной продольной н. с. величину угла  $\theta'$ . Если поперечная составляющая н. с. равна нулю, то и угол  $\theta' = 0$ .

Синхронный двигатель может работать устойчиво только при равенстве частот вращения  $n_{\text{рот}}$  ротора и магнитного поля якоря  $n$ . При  $n_{\text{рот}} \neq n$  полюсы статора перемещаются относительно полюсов ротора, момент вращения имеет переменный знак и его средняя величина равна нулю. Следовательно, синхронный двигатель не может быть запущен простым подключением к сети, так как вращающееся магнитное поле статора при этом перемещается с большой частотой относительно неподвижного ротора и машина будет развивать знакопеременный момент со средним значением, равным нулю.

Для пуска двигателя его необходимо привести во вращение, либо при помощи вспомогательного двигателя, либо при помощи пусковой обмотки до частоты, близкой к синхронной, при которой машина может втянуться в синхронизм и вращаться затем с синхронной частотой  $n_{\text{рот}} = n = 60/f_p$ .

При изменении нагрузки частота вращения двигателя остается постоянной, изменяется только величина угла  $\theta'$ . Необходимо отметить, что мощность двигателя определяется не углом  $\theta'$ , а углом  $\theta$ , который учитывает также поток рассеяния обмотки якоря. Чем больше нагружают двигатель, тем больше угол  $\theta$  и натяжение магнитных силовых линий в зазоре (сцепление разноименных полюсов). Если нагрузка превышает допустимую величину (угол  $\theta$  достигает предельного значения  $90^\circ$ ), то машина выпадает из синхронизма.

**Векторные диаграммы.** Векторные диаграммы генератора и двигателя аналогичны, но имеется разница, заключающаяся в следующем: геометрическая сумма э. д. с. и напряжений якоря равна в генераторном режиме э. д. с. холостого хода  $\dot{E}_{\text{г0}}$ , а в двигательном режиме — напряжению сети  $\dot{U}_c$ . Для машин с ненасыщенной магнитной цепью можно написать для генераторного режима

$$\dot{E}_{\text{г0}} = \dot{U}_r + \dot{I}_r r + j \dot{I}_r x_c; \quad (32.1)$$

для двигательного режима

$$\dot{U}_c = -\dot{E}_{\text{д0}} + \dot{I}_r r + j \dot{I}_r x_c, \quad (32.2)$$

где  $-\dot{E}_{\text{д0}}$  — составляющая напряжения, уравнивающая э. д. с.  $\dot{E}_{\text{д0}}$ , индуцированную потоком обмотки возбуждения.

В соответствии с (32.2) построены упрощенные векторные диаграммы для двигателя при отстающем токе (рис. 32.2, а) и опере-

жающим токах (рис. 32.2, б). В отличие от генераторного режима в синхронном двигателе реакция якоря при отстающем токе действует намагничивающим образом, а при опережающем — размагничивающим. Отсюда следует, что для номинального режима работы двигателя при опережающем токе требуется большой ток возбуждения, чем при отстающем; поэтому расчет двигателя ведется для опережающего тока. Векторные диаграммы строят для определения н. с. и тока обмотки возбуждения двигателя, работающего при заданных напряжении сети  $\dot{U}_c$ , токе  $I$  и  $\cos \varphi$ . В этом случае при построении диаграмм так же, как и для генератора, должны

быть известны данные обмотки статора, его параметры и характеристика х. х. Диаграммы двигателя используют при исследовании его рабочих свойств.

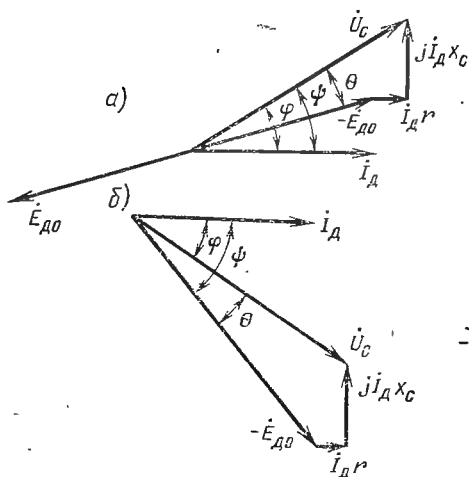


Рис. 32.2. Упрощенные векторные диаграммы двигателя

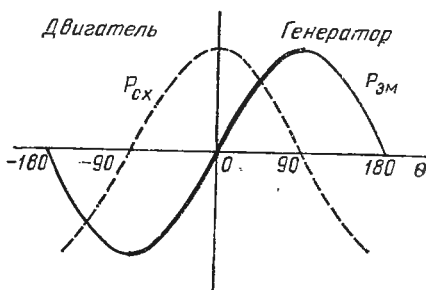


Рис. 32.3. Зависимость  $P_{эм}$  и  $P_{сх}$  от угла  $\theta$

**Электромагнитная мощность.** Для электромагнитной мощности  $P_{эм}$  и удельной синхронизирующей  $P_{сх}$  остаются в силе выражения (31.5 и 31.14), полученные для генераторного режима; необходимо, однако, учесть, что если для генератора, подключенного параллельно сети, электромагнитная мощность, а вместе с ней и угол  $\theta$  положительны, то для двигателя эти величины отрицательны, так как генератор отдает электрическую энергию в сеть, а двигатель потребляет ее из сети. Физически это означает, что электромагнитный момент двигателя  $M_{эм}$ , соответствующий мощности  $P_{эм}$ , является вращающим, уравновешивающим нагрузочный момент на валу, а в генераторе этот момент является нагрузочным, уравновешивающим вращающий момент приводного двигателя.

На рис. 32.3 показана зависимость  $P_{эм}$  и  $P_{сх}$  от угла  $\theta$  для генераторного и двигательного режимов неявнополюсной машины. Толстой линией выделена часть кривой  $P_{эм}$ , соответствующая области устойчивой работы синхронной машины при  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ , где  $P_{сх} > 0$ . В другом масштабе эти же кривые дают соответственно величины электромагнитного момента  $M_{эм} = P_{эм} / \Omega_c$ , где  $\Omega_c$  — син-

хронная угловая частота. Отношение  $M_{\text{эм max}}/M_{\text{эм ном}}$  характеризует перегрузочную способность двигателя. Для нормальных синхронных двигателей это отношение равно  $2 \div 2,7$ .

При работе машины в режиме двигателя электромагнитная мощность  $P_{\text{эм}}$  представляет собой мощность, передаваемую от статора к ротору через воздушный зазор. Подведенная к сети мощность  $P_1$  больше  $P_{\text{эм}}$  на величину потерь в обмотке статора:

$$P_1 = P_{\text{эм}} + m I^2 r = m U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi, \quad (32.3)$$

где  $\varphi$  — угол сдвига фаз между током и напряжением на зажимах двигателя.

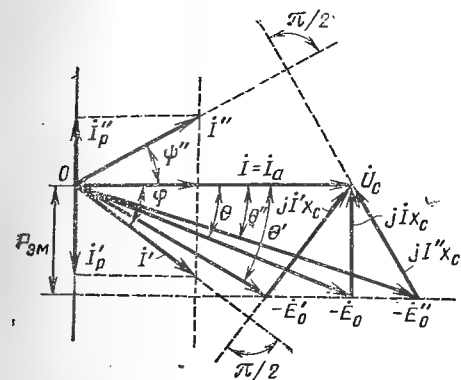


Рис. 32.4. Векторная диаграмма токов и э.д. с. двигателя при изменении  $I_b$

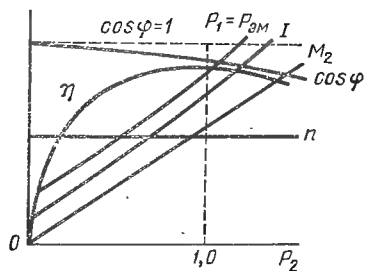


Рис. 32.5. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Полезная мощность двигателя  $P_2$  меньше  $P_{\text{эм}}$  на величину потерь в стали  $P_{\text{ст}}$  и механических  $P_{\text{мех}}$ . Таким образом, полезная мощность синхронного двигателя

$$P_2 = P_{\text{эм}} - P_{\text{ст}} - P_{\text{мех}} = P_1 - m I^2 r - P_{\text{ст}} - P_{\text{мех}}. \quad (32.4)$$

**Работа двигателя при изменении  $I_b$  и  $M_{\text{эм}} = \text{const}$ .** Активная составляющая тока двигателя  $I_a = I \cos \varphi$ , определяемая его нагрузкой и потерями, в отличие от генераторов совпадает с напряжением сети  $U_c$ , как показано на диаграмме рис. 32.4. Реактивная составляющая тока двигателя  $I_p = I \sin \varphi$  зависит при данной активной нагрузке, т. е. при постоянном электромагнитном моменте  $M_{\text{эм}}$ , от тока возбуждения  $I_b$ , изменяя который можно установить сдвиг фаз  $\varphi$  между током и напряжением нужной величины. Зависимость  $I = f(I_b)$  при  $M_{\text{эм}} = \text{const}$  и  $\cos \varphi = \text{const}$  носит и здесь название U-образных характеристик, которые имеют такой же вид, как и для генератора (см. рис. 31.11), за исключением того, что кривая  $P_2 = 0$  невозможна в двигательном режиме, где наименьшая мощность — это мощность холостого хода  $P_2 = P_0$ , и U-образная кривая не может касаться оси абсцисс. U-образные характеристики могут быть сняты опытным путем или построены по диаграмме (рис. 32.4).

Величины  $P_{эм}$  и  $\theta$  для генераторного и двигательного режимов имеют разные знаки, чем и определяется разница между диаграммами рис. 31.10 и 32.4. В генераторном и в двигательном режимах  $I_B$  регулирует обмен реактивной энергии между данной синхронной машиной и энергосистемой. В этом или другом режиме перевозбужденная машина является для сети емкостной нагрузкой, т. е. реактивная составляющая тока  $I_p''$  опережает напряжение сети  $U_c$  на  $\pi/2$ . Недовозбужденная машина является для сети индуктивной нагрузкой, т. е. реактивная составляющая тока  $I_p'$  отстает от  $U_c$  на  $\pi/2$ . Возможность простым способом регулировать реактивный ток, а вместе с тем и коэффициент мощности — одно из наиболее ценных свойств синхронного двигателя, которое позволяет использовать машину также для разгрузки электрических станций и линий электропередачи от реактивной энергии, т. е. использовать машину в режиме синхронного компенсатора.

**Рабочие характеристики при переменном  $M_{эм}$  и  $I_B = \text{const}$ .** Рабочие характеристики представляют собой зависимость  $n$ ,  $M_2$ ,  $\cos \varphi$ ,  $I$ ,  $P_1$  и  $\eta = f(P_2)$ . На рис. 32.5 изображены рабочие характеристики, из которых видно, что частота вращения двигателя  $n$  остается постоянной при изменении нагрузки. Если установка  $\cos \varphi = 1$  произведена при х. х., то при нагрузке  $\cos \varphi < 1$ . Регулируя ток возбуждения, можно установить  $\cos \varphi = 1$  при любой нагрузке. Двигатели обычно рассчитываются для работы с  $\cos \varphi = 0,8$  и опережающим реактивным током, т. е. используются в режиме двигатель-компенсатор. При  $\cos \varphi = 1$  синхронный двигатель имеет меньшие размеры, чем асинхронный такой же мощности, у которого  $\cos \varphi < 1$ , так как размеры машины определяются кажущейся мощностью  $S = mUI$ .

Характеристика к. п. д.  $\eta = f(P_2)$  имеет обычный для всех электрических двигателей вид. К. п. д. у синхронных двигателей на несколько процентов выше, чем у асинхронных. Синхронный двигатель менее чувствителен к колебаниям напряжения сети, так как его максимальный момент  $M_{2\max}$  пропорционален первой степени  $U_c$ , в то время как у асинхронного двигателя пропорционален  $U_c^2$ .

**Асинхронный пуск синхронных двигателей.** Как говорилось выше, для пуска синхронного двигателя его ротор необходимо привести во вращение с частотой, близкой к синхронной. Это можно осуществить двумя способами: при помощи вспомогательного двигателя и с помощью асинхронного пуска. Пуск при помощи вспомогательного двигателя может быть применен только при условии пуска вхолостую, тогда мощность вспомогательного двигателя составит примерно 10% от мощности синхронного двигателя. Если пуск должен производиться при номинальной нагрузке (что чаще всего встречается на практике), то этот способ неприменим, так как мощность вспомогательного двигателя должна быть при этом больше мощности синхронного двигателя.

Для возможности асинхронного пуска двигатель снабжают пусковой обмоткой, которую закладывают в полюсные наконечники или делают ротор массивным со сплошными полюсными наконеч-

никами без специальной пусковой обмотки. Асинхронный пуск двигателей малой мощности до 50 кВт можно осуществить при отсутствии пусковой обмотки за счет токов, индуцированных в массивных частях ротора и в обмотке возбуждения, замкнутой на сопротивление пуска  $R_{\text{п}}$ . Синхронные двигатели мощностью выше 50 кВт для пуска снабжаются короткозамкнутой обмоткой, расположенной в полюсных наконечниках ротора. Эти обмотки могут быть замкнутыми аналогично роторной обмотке асинхронного двигателя. У двигателей большой мощности выше 2000 кВт возникает большой нагрев пусковой обмотки и нарушается механическая прочность

(нарушение паек и разрывы стержней). Вследствие этого такие двигатели изготавливают с массивным ротором со сплошными полюсными наконечниками, соединенными по обеим сторонам ротора медными кольцами. Индуцированные в полюсных наконечниках токи создают асинхронный момент. При пуске применяют те же методы и происходят те же процессы, что и при пуске асинхронных двигателей. На время пуска

обмотка возбуждения должна быть отключена от источника тока. Ее нельзя оставлять разомкнутой, так как в ней будет индуцироваться большая э. д. с., на которую эта обмотка не рассчитана, что может привести к пробое изоляции. Обмотку возбуждения нельзя также замыкать накоротко, так как при этом возникает большой ток, который может привести к перегреву обмотки, а также вызвать явление одноосного включения, сущность которого состоит в том, что при пуске под нагрузкой ротор может достигнуть частоты, примерно равной половине синхронной, и в синхронизм войти не сможет. Во избежание указанных явлений обмотка возбуждения должна быть замкнута на время пуска на сопротивление  $R_{\text{п}} \approx 10R_{\text{в}}$ , где  $R_{\text{в}}$  — сопротивление обмотки возбуждения.

При достаточной величине асинхронного пускового момента  $M_{\text{п}}$  двигатель развернется до частоты, составляющей примерно 95% от синхронной, т. е. до скольжения  $S=0,05$ , при котором перемещение магнитного поля якоря относительно полюсов ротора происходит достаточно медленно, чтобы обеспечить хорошие условия для втягивания в синхронизм. При  $S=0,05$  асинхронный момент  $M_{\text{вх}}$  называют *входным*, способствующим синхронизации двигателя с сетью. Пусковой момент  $M_{\text{п}}$  должен быть достаточным для того, чтобы разогнать механизм, который приводится во вращение синхронным двигателем.

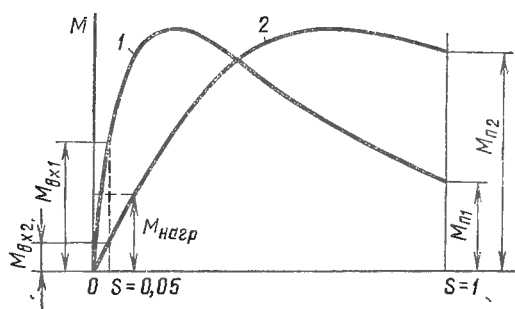


Рис. 32.6. Кривые зависимости моментов двигателя от скольжения

На рис. 32.6 приведены кривые моментов для двух пусковых обмоток: 1 — при малом  $M_{п1}$  и большом  $M_{вх1}$  и 2 — при малом  $M_{вх2}$  и большом  $M_{п2}$ . При заданной нагрузке втягивание в синхронизм будет происходить при меньшем скольжении у двигателя, имеющего кривую 1, и, следовательно, при более благоприятных условиях, чем по кривой 2. Отсюда также следует, что двигатели, развивающие при пуске большой пусковой момент  $M_{п}$ , имеют меньше входной момент  $M_{вх}$ , т. е. труднее синхронизируются с сетью.

После того как двигатель достигнет установившейся асинхронной частоты, подключают обмотку возбуждения к источнику постоянного тока и машина втягивается в синхронизм. Момент включения постоянного тока должен быть выбран надлежащим образом; для этого в цепь обмотки возбуждения включают двусторонний амперметр, стрелка которого будет колебаться медленно в соответствии со скольжением. Предварительно до включения двигателя нужно отметить, в какую сторону отклоняется стрелка при протекании постоянного тока. Включение обмотки возбуждения при вращающемся двигателе производится в то время, когда колеблющаяся стрелка отклоняется в замеченном ранее направлении. При этом полярность полюсов, задаваемая постоянным током, совпадает с полярностью вращающегося магнитного поля якоря и создаются благоприятные условия для вхождения в синхронизм.

## § 32.2. Реактивный синхронный двигатель

Синхронный реактивный двигатель имеет обычный для синхронных машин трехфазный или однофазный статор и ротор с явно выраженными полюсами, но без обмотки возбуждения. В этом случае машина возбуждается не со стороны ротора, как в обычных синхронных двигателях, а со стороны статора за счет реактивной составляющей тока, поступающей из сети в его обмотку. Эта составляющая тока в статоре создает продольный магнитный поток, являющийся потоком возбуждения.

Действие реактивного двигателя основывается на использовании добавочной электромагнитной мощности, которая носит название реактивной мощности [второе слагаемое выражения (31.9)] и обуславливается неравенством магнитных сопротивлений по продольной и поперечной осям машины  $x_d \neq x_q$ . Для получения наибольшего значения  $P_{эм.р}$  ротор выполняют таким образом, чтобы  $x_d \approx 3x_q$ , тогда  $P_{эм.р \max} = mU^2/x_d$ . Для уменьшения потерь на трение о воздух межполюсное пространство заливают немагнитным материалом, например алюминием, и ротор принимает цилиндрическую форму.

Пусковой момент создается так же, как в асинхронных двигателях, в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с токами в пусковой обмотке (при наличии) либо с вихревыми токами в массивных частях ротора. Втягивание в синхронизм в реактивных двигателях осуществляется только за счет реактивного момента, который намного меньше синхронизирующе-

го момента обычного синхронного двигателя. Для того чтобы реактивный момент обеспечил вытягивание в синхронизм, пуск двигателя рекомендуется производить при нагрузке, не превышающей  $0,25 \div 0,30$  от номинальной.

Практическое применение получили однофазные реактивные двигатели малой мощности от нескольких ватт до нескольких сотен ватт, у которых меньшая экономичность (по отношению к асинхронным) окупается отсутствием обмотки возбуждения и стабильной частотой вращения. Наибольшее применение имеют однофазные реактивные конденсаторные двигатели, схема соединений которых аналогична однофазным асинхронным двигателям. Для пуска (создания вращающегося магнитного поля) в однофазных реактивных двигателях в фазы статора заложены две обмотки: рабочая и пусковая, сдвинутые в пространстве на угол  $90^\circ$ . Для сдвигов токов по фазе на угол, близкий  $90^\circ$ , последовательно с пусковой обмоткой включают конденсатор соответствующей емкости. В этом случае при подключении обмоток к сети однофазного переменного тока возникает вращающееся магнитное поле, взаимодействующее с токами в роторе.

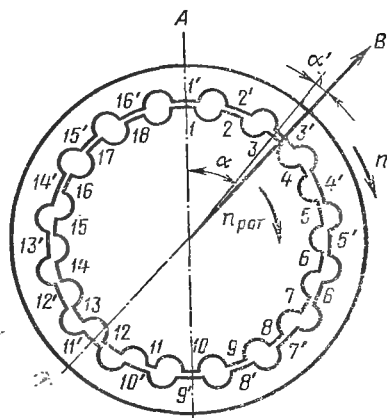


Рис. 32.7. Схема синхронного редукторного реактивного двигателя

На рис. 32.7 показано устройство редукторного реактивного синхронного двигателя, который дает возможность получить частоту вращения ротора  $n_{\text{рот}}$  меньшую, чем синхронная  $n = 60f/p$ . Статор и ротор выполняют из листов электротехнической стали. На статоре располагают обмотку, создающую магнитное поле, вращающееся с частотой  $n$ . Число зубцов ротора  $Z_{\text{рот}}$  не равно числу зубцов статора  $Z_{\text{стат}}$ . Если ось магнитного поля занимает положение, указанное линией A, то зубцы ротора 1 и 10 соответственно расположены против зубцов статора 1' и 9', а остальные зубцы расположены симметрично относительно линии A. Когда поток повернется так, что его ось пройдет через середину зубца 2', ротор под влиянием сил магнитного притяжения повернется и середина зубца 2 станет против середины зубца 2'. Когда магнитный поток повернется на угол  $\alpha$  и займет положение, указанное линией B, ротор повернется только на такой угол  $\alpha'$ , при котором середина зубца 3 окажется под серединой зубца 3'. После этого середина зубца 4 совпадет с серединой 4' и т.д. При повороте оси магнитного поля на  $180^\circ$  относительно линии A середина зубца 9 станет против середины 9', а при повороте на  $360^\circ$  против середины зубца 1' окажется середина зубца 17.



Таким образом при одном обороте магнитного поля статора ротор поворачивается на количество зубцов, составляющих разность  $Z_{\text{рот}} - Z_{\text{стат}}$ . В данном случае  $18 - 16 = 2$ , т. е. на  $2/18 = 1/9$  часть окружности. Следовательно,

$$n_{\text{рот}} = \frac{Z_{\text{рот}} - Z_{\text{стат}}}{Z_{\text{рот}}} \cdot \frac{60f}{p} = \frac{Z_{\text{рот}} - Z_{\text{стат}}}{Z_{\text{рот}}} n. \quad (32.5)$$

Если  $Z_{\text{рот}} - Z_{\text{стат}} = 2p$ , то

$$n_{\text{рот}} = 120f / Z_{\text{рот}} = 2pn / Z_{\text{рот}}. \quad (32.6)$$

При  $Z_{\text{рот}} > Z_{\text{стат}}$  ротор вращается в ту же сторону, что и магнитное поле статора, при  $Z_{\text{рот}} < Z_{\text{стат}}$  — в противоположную.

Несмотря на имеющиеся недостатки, реактивные синхронные двигатели находят широкое применение в схемах синхронной связи и сигнализации, в телемеханике, радиолокации, а также в приборах и машинах бытового назначения, где требуется постоянная частота вращения при изменении нагрузки от нуля до номинальной.

### § 32.3. Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор предназначен для улучшения коэффициента мощности системы и представляет собой синхронный двигатель, который не несет механической нагрузки, и поэтому

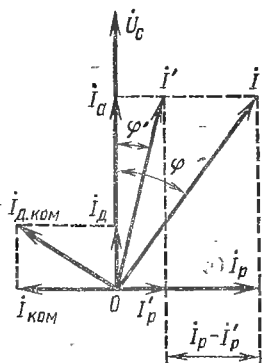


Рис. 32.8. Векторная диаграмма компенсатора

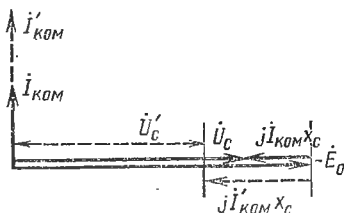


Рис. 32.9. Принцип стабилизации напряжения при помощи компенсатора

имеет облегченную конструкцию. Так как наиболее распространенными потребителями энергий являются асинхронные двигатели, загружающие генераторы и линии передачи отстающим реактивным током, то синхронный компенсатор работает перевозбужденным и реактивный ток является опережающим. Допустим, что режим работы установки характеризуется векторами  $\dot{U}_c$  и  $\dot{I}$  диаграммы, показанной на рис. 32.8; требуется установить синхронный компенсатор для повышения  $\cos \varphi$  до значения  $\cos \varphi'$ . Очевидно, что компенсатор должен быть рассчитан на ток  $\dot{I}_{\text{КОМ}} = \dot{I}_p - \dot{I}'_p$ , и его реактивная мощность  $Q_{\text{КОМ}} = m U_c I_{\text{КОМ}}$ , которая отличается от его

полной мощностью  $S_{\text{ком}}$  из-за наличия потерь, близких к потерям х. х. двигателя  $P_0$ . Если машина предназначена не только для улучшения  $\cos \varphi$ , но и для работы в качестве двигателя, то кроме тока  $I_{\text{ком}}$  будет еще активная составляющая  $I_d$ , и ток двигателя-компенсатора  $I_{d,\text{ком}} = \sqrt{I_{\text{ком}}^2 + I_d^2}$ .

Машину невыгодно использовать только в режиме компенсатора, так как при номинальном токе возбуждения и отсутствии активного тока реактивная составляющая меньше номинального значения тока и обмотку статора нельзя загрузить полностью по току (см. U-образные кривые, рис. 31.11). Очевидно, что компенсатор должен быть установлен как можно ближе к потребителю энергии, потому что при этом разгружается от реактивного тока не только электрическая станция, но и линия передачи энергии.

Рассмотрим пример. К электрической станции с установленной мощностью в 100 кВ·А подключен потребитель с активной мощностью 60 кВт при  $\cos \varphi = 0,6$ . Так как полная мощность потребителя составляет 100 кВ·А, то станция полностью загружена по току, несмотря на то, что при  $\cos \varphi = 1$  станция могла бы дать 100 кВт активной мощности; низкий  $\cos \varphi$  не дает возможности использовать установленную мощность. Если установить синхронный компенсатор, реактивная мощность которого  $Q_{\text{ком}} = \sqrt{100^2 - 60^2} = 80$  кВ·А, то этим разгружаются от реактивного тока электрическая станция и линия передачи, и возможно загрузить их активным током. Если электрическая станция и линия передачи загружены опережающим реактивным током, то для повышения  $\cos \varphi$  компенсатор должен быть недовозбужденным. Наряду с улучшением  $\cos \varphi$  синхронные компенсаторы автоматически стабилизируют напряжение, препятствуя его изменению. Допустим, что режим компенсатора (рис. 32.9) определяется  $\vec{U}_c = -\vec{E}_0 + jI_{\text{ком}}X_c$ , вследствие увеличения нагрузки напряжение снижается до величины  $U_c'$ , а ток возрастает до величины  $I'_{\text{ком}} > I_{\text{ком}}$ , так как величина  $\vec{E}_0$  зависит от тока возбуждения, который остался неизменным. Возросший опережающий ток  $I'_{\text{ком}}$  увеличит намагничивающую реакцию якоря работающих генераторов, вследствие чего напряжение сети станет больше величины  $U_c'$ , которая была бы при отсутствии компенсатора, но меньше величины  $U_c$ , которая была до увеличения нагрузки. Запускают синхронные компенсаторы так же, как и синхронные двигатели.

## Глава 33

### ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННЫХ МАШИНАХ

В синхронной машине при переходе от одного установившегося режима работы к другому возникает ряд явлений, которые имеют важное значение в практике. Эти явления переходного процесса обусловлены изменением энергии магнитных полей машины. Они возникают при всяком нарушении режима работы синхронной машины и особенно резко проявляются при внезапном к. з. синхронного генератора.

#### § 33.1. Определение и виды внезапного короткого замыкания

Под внезапным коротким замыканием понимают режим к. з. в промежуток времени между начальным моментом к. з. и режимом

установившегося к. з. На рис. 33.1 изображены схемы одно-, двух- и трехфазного к. з. Обычно сначала возникает одно- или двухфазное к. з., которое затем может перейти в трехфазное к. з. Длительность процесса к. з. синхронного генератора весьма невелика ( $0,1 \div 0,3$  с), так как при большей продолжительности процесса генератор не сможет работать синхронно с энергосистемой. При внезапном к. з. генератора в его обмотках протекают токи, значительно превосходящие номинальные значения. Эти токи вызывают большие механические силы и электромагнитные моменты, что необходимо учитывать при изготовлении машины, обмоток и аппа-

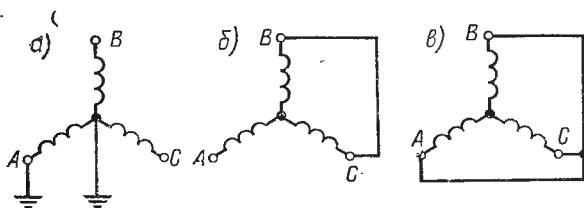


Рис. 33.1. Схемы коротких замыканий:  
а — однофазное; б — двухфазное; в — трехфазное

ратуры, а также при их выборе. Расчет токов короткого замыкания сопряжен со значительными трудностями, и здесь будут рассмотрены некоторые основные положения.

Рассматривают процесс к. з. при следующих условиях:

- 1) частота вращения ротора равна синхронной и остается неизменной;
- 2) магнитная цепь ненасыщена;
- 3) все величины ротора приведены к обмоточным данным статора;
- 4) активное сопротивление обмоток не оказывает практически заметного влияния на величину токов, определяя в то же время затухание неустановившегося режима;
- 5) короткому замыканию предшествовал холостой ход; э. д. с. генератора  $e_0 = \sqrt{2}E_0 \sin(\omega t + \alpha)$ . В зависимости от момента замыкания угол  $\alpha$  может принимать значение от 0 до  $2\pi$  и при  $t=0$  э. д. с.  $e_0 = \sqrt{2}E_0 \sin \alpha$ , а ток  $i=0$ .

## § 33.2. Трехфазное короткое замыкание

**Токи в обмотках и параметры.** На рис. 33.2 показаны обозначения индуктивных сопротивлений:  $x_s$  — определяемого потоками рассеяния обмотки якоря,  $x_{Bs}$  — обмотки возбуждения,  $x_{ysd}$  — определяемого продольной успокоительной обмотки индуктивного сопротивления  $x_{ad}$ , зависящего от продольного потока реакции якоря. По истечении определенного промежутка времени после к. з., когда

практически затухает неустановившийся процесс, в обмотке якоря протекает установившийся ток к. з.:

$$i_{y.k} = (\sqrt{2} E_0' x_d) \sin(\omega t + \alpha - \pi/2) = -(\sqrt{2} E_0' x_d) \cos(\omega t + \alpha).$$

Этот ток, как известно, возбуждает магнитный поток с постоянной амплитудой, который вращается синхронно с ротором и поэтому не наводит э. д. с. ни в обмотке возбуждения, в которой протекает только постоянный ток  $I_B$ , ни в успокоительной обмотке, в которой ток равен нулю.

По-иному дело обстоит во время неустановившегося процесса, когда нарастает и затухает свободный ток якоря и его магнитный поток, сцепленный с другими обмотками, и когда в кривой тока имеются, как известно, периодическая и апериодическая составляющие.

При изменении амплитуды периодического тока якоря изменяется амплитуда вращающегося магнитного потока. Изменение величины магнитного потока якоря, неподвижного относительно обмоток возбуждения и успокоительной, индуцирует в них апериодические затухающие токи. Эти токи в свою очередь индуцируют в обмотке якоря периодические токи с убывающей амплитудой подобно тому, как постоянный ток обмотки возбуждения  $I_B$  индуцирует в обмотке якоря синусоидальный ток  $i_{y.k}$  с постоянной амплитудой, равной  $\sqrt{2} E_0' / x_d$ . Таким образом, при коротком замыкании возникают взаимно связанные свободные затухающие токи: периодический в обмотке якоря и апериодический в обмотках возбуждения и успокоительной.

Апериодические токи обмотки якоря возбуждают магнитный поток, неподвижный относительно якоря и затухающий с течением времени. Этот поток индуцирует при вращении ротора в обмотках возбуждения и успокоительной затухающий периодический ток, протекающий в обмотках возбуждения и успокоительной, возбуждают пульсирующий магнитный поток, неподвижный относительно этих обмоток и затухающий со временем. Для удобства рассмотрения разложим пульсирующий поток на два вращающихся. Если машина имеет вращающиеся полюсы, то прямое поле, вращающееся в ту же сторону, что и полюсы, пересекает обмотку якоря (статора) с двойной синхронной частотой и индуцирует в ней затухающую э. д. с. двойной частоты. Обратное поле перемещается в сторону, противоположную направлению вращения полюсов; оно неподвижно относительно обмотки статора. Изменение во времени величины обратного поля индуцирует в обмотке статора апериодический ток. Таким образом, кроме ранее указанных токов при к. з. возникают еще следующие взаимосвязанные затухающие токи:

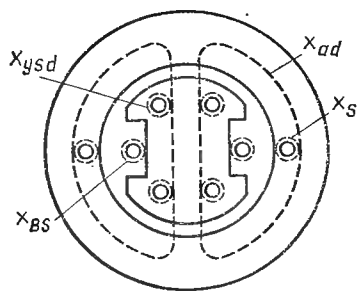


Рис. 33.2. Индуктивные сопротивления, определяемые потоками рассеяния и продольным потоком реакции якоря

апериодических в обмотке якоря и периодические в обмотках возбуждения и успокоительной.

Из сказанного следует, что в течение неустановившегося процесса при трехфазном к. з. на зажимах генератора, имеющего успокоительную обмотку, можно рассматривать обмотку якоря как первичную, а обмотки возбуждения и успокоительную как вторичные короткозамкнутые обмотки трехобмоточного трансформатора (рис. 33.3).

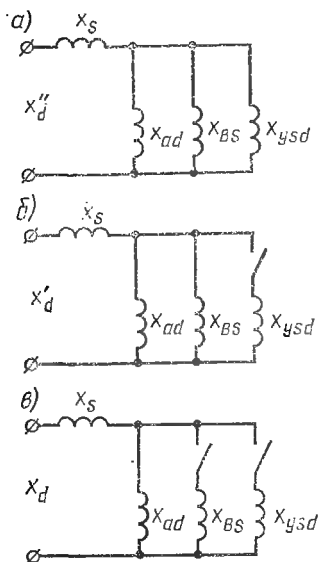


Рис. 33.3. Схемы замещения синхронной машины

Обратимся к основным уравнениям, устанавливающим зависимость между э. д. с., токами и параметрами обмоток. Для обмотки якоря можем написать  $e_0 + e_{Lя} + e_{Мя.в} + e_{Мя.у} = ir$ , где  $e_L$  и  $e_M$  — э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции (индексы я, в и у обозначают обмотки якоря, возбуждения и успокоительную. Например, под  $e_{Мя.в}$  следует понимать э. д. с., индуктированную в обмотке якоря при изменении тока в обмотке возбуждения, и т. д.);  $i$  — ток в обмотке якоря;  $r$  — активное сопротивление одной фазы обмотки якоря.

Учитывая, что

$$e_{Lя} = -L_{я} \frac{di}{dt} = -\frac{x_{Lя}}{\omega} \frac{di}{dt} = -\frac{x_{ad} + x_s}{\omega} \frac{di}{dt};$$

$$e_{Мя.в} = -M_{я.в} \frac{di_v}{dt} = -\frac{x_{Мя.в}}{\omega} \frac{di_v}{dt} = -\frac{x_{ad}}{\omega} \frac{di_v}{dt};$$

$$e_{Мя.у} = -M_{я.у} \frac{di_y}{dt} = -\frac{x_{Мя.у}}{\omega} \frac{di_y}{dt} = -\frac{x_{ad}}{\omega} \frac{di_y}{dt},$$

можем написать

$$e_0 - \frac{x_{ad} + x_s}{\omega} \frac{di}{dt} - \frac{x_{ad}}{\omega} \left( \frac{di_v}{dt} + \frac{di_y}{dt} \right) = 0, \quad (33.1)$$

где активным падением напряжения пренебрегаем, приняв  $ir=0$ .

Для обмотки возбуждения  $U_v + e_{Lв} + e_{Мв.я} + e_{Мв.у} = I_v r_v + i_v r_v$ . Здесь  $U_v$  и  $I_v$  — постоянные напряжение и ток обмотки возбуждения;  $i_v$  — сумма периодического и аperiodического токов, индуктированных в обмотке возбуждения. Учитывая также, что  $U_v = I_v r_v$ , и полагая  $i_v r_v = 0$ , можем написать

$$-\frac{x_{ad} + x_{bs}}{\omega} \frac{di_v}{dt} - \frac{x_{ad}}{\omega} \left( \frac{di}{dt} + \frac{di_y}{dt} \right) = 0. \quad (33.2)$$

Аналогично для успокоительной обмотки  $e_{Ly} + e_{MyA} + e_{MyB} = i_y r_y$ , откуда при  $i_y r_y = 0$  получим

$$-\frac{x_{ad} + x_{ysd}}{\omega} \frac{di_y}{dt} - \frac{x_{ad}}{\omega} \left( \frac{di}{dt} + \frac{di_B}{dt} \right) = 0. \quad (33.3)$$

Из (33.2) и (33.3) имеем

$$\begin{aligned} \frac{di_B}{dt} &= - \frac{x_{ad} x_{ysd}}{x_{ad} x_{Bs} + x_{ad} x_{ysd} + x_{Bs} x_{ysd}} \frac{di}{dt}; \\ \frac{di_y}{dt} &= - \frac{x_{ad} x_{Bs}}{x_{ad} x_{Bs} + x_{ad} x_{ysd} + x_{Bs} x_{ysd}} \frac{di}{dt}. \end{aligned} \quad (33.4)$$

Подставив (33.4) в (33.1), найдем

$$\omega e_0 - \left( x_s + \frac{1}{1/x_{ad} + 1/x_{Bs} + 1/x_{ysd}} \right) \frac{di}{dt} = 0, \quad (33.5)$$

или

$$\omega e_0 - x_d'' \frac{di}{dt} = 0. \quad (33.6)$$

Из (33.5) и (33.6) получаем формулу для эквивалентного сопротивления фазы обмотки якоря:

$$x_d'' = x_s + \frac{1}{1/x_{ad} + 1/x_{Bs} + 1/x_{ysd}}. \quad (33.7)$$

Это выражение показывает, что при внезапном к. з. каждая фаза обмотки машины может быть изображена эквивалентной схемой, содержащей индуктивное сопротивление рассеяния  $x_s$ , и последовательно с ним включены три параллельные ветви с индуктивными сопротивлениями  $x_{ad}$ ,  $x_{Bs}$  и  $x_{ysd}$  (рис. 33.3, а).

Величина  $x_d''$  носит название сверхпереходного синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси машины. Сопротивление  $x_d''$  меньше сопротивления  $x_d$  вследствие размагничивающего влияния, которое оказывают ток и, индуцированные в обмотках возбуждения и успокоительной. Режим, при котором индуцированные свободные токи протекают не только в обмотке возбуждения, но и в успокоительной, называют *сверхпереходным*.

Ток якоря  $i = i_p + i_a$ , где  $i_p$  — периодический ток;  $i_a$  — аperiodический ток. Если пренебречь затуханием, то  $i = -(\sqrt{2}E_0/x_d'') \times \cos(\omega t + \alpha) + A$ . Так как при  $t=0$  ток  $i=0 = -(\sqrt{2}E_0/x_d'') \cos(\alpha + A)$ , то  $A = (\sqrt{2}E_0/x_d'') \cos \alpha$  и  $i = -(\sqrt{2}E_0/x_d'') \cos(\omega t + \alpha) + (\sqrt{2}E_0/x_d'') \times \cos \alpha$ .

Из последнего равенства следует, что аperiodическая составляющая тока имеет наибольшую величину при  $\alpha=0$ . На рис. 33.4 изображена кривая изменения тока к. з. при  $\alpha=0$  и отсутствии затухания, откуда видно, что наибольший ток к. з. «ударный ток» не может превзойти величины  $2\sqrt{2}E_0/x_d''$ . При  $\alpha \neq 0$  наибольшее значение тока меньше, чем  $2\sqrt{2}E_0/x_d''$ .

Сначала после внезапного к. з. ток статора начинает быстро уменьшаться главным образом за счет затухания апериодической составляющей тока в успокоительной обмотке, имеющей малую постоянную времени. На эквивалентной схеме (рис. 33.3, б) показано отключение успокоительной обмотки. Далее наступает переходный процесс до установившегося режима к. з. В этом режиме амплитуда переходного тока уменьшается в основном за счет затухания апериодической составляющей тока в обмотке возбуждения.

После затухания переходного процесса наступает установившийся режим, которому соответствует эквивалентная схема, изображенная на рис. 33.3, в.

Апериодическая составляющая тока статора затухает достаточно быстро, и вместе с ней затухают переменные токи в успокоительной обмотке и в обмотке возбуждения.

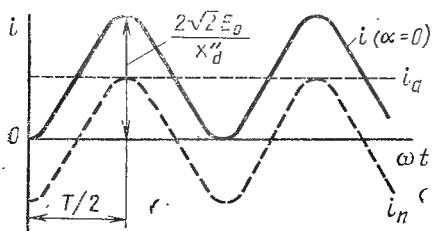


Рис. 33.4. Кривая изменения тока к. з. при  $\alpha=0$

На рис. 33.5 показаны осциллограммы токов обмотки якоря  $i(a)$ : обмотки возбуждения  $i_b(b)$  и успокоительной обмотки  $i_y(v)$  при внезапном к. з. и при  $\alpha=0$ . Кроме постоянного по величине тока в обмотке возбуждения протекают затухающие периодические и апериодические токи. В успокоительной обмотке протекают только затухающие периодические и апериодические токи. Величины  $x_d''$ ,  $x_d'$  и  $x_q''$  не остаются постоянными, так как  $x_d''$  изменяется от своего начального значения до величины  $x_d'$ , которая в свою очередь изменяется до величины  $x_d$ , а  $x_q''$  — до величины  $x_q$ . При расчетах принимают начальные значения  $x_d''$ ,  $x_d'$  и  $x_q''$ . Те же значения токов и параметров можно найти, исходя из известного положения, что индуцированные токи стремятся сохранить неизменным магнитный поток, который был в момент короткого замыкания.

**Определение параметров «статическим» методом.** На рис. 33.6 показана схема для опытного определения параметров  $x_d''$  и  $x_q''$ . Две фазы обмотки якоря подключают к однофазной сети, напряжение которой  $U_c$  можно изменять; например, при помощи индукционного регулятора (ИР) обмотку возбуждения (ОВ) замыкают накоротко. Напряжение  $U$  устанавливают такой величины, чтобы ток  $I$  был примерно равен 0,25 номинального значения. Поворачивая ротор, находят два положения, соответствующие  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$ . Следует иметь в виду, что при большем токе, равном  $I_{\max}$ , падение напряжения в индукционном регуляторе будет наибольшим, а напряжение на зажимах генератора — наименьшим, равным  $U_{\min}$ , поэтому  $0,5U_{\min}/I_{\max}=x_d''$ , а  $0,5U_{\max}/I_{\min}=x_q''$ . Если машина не

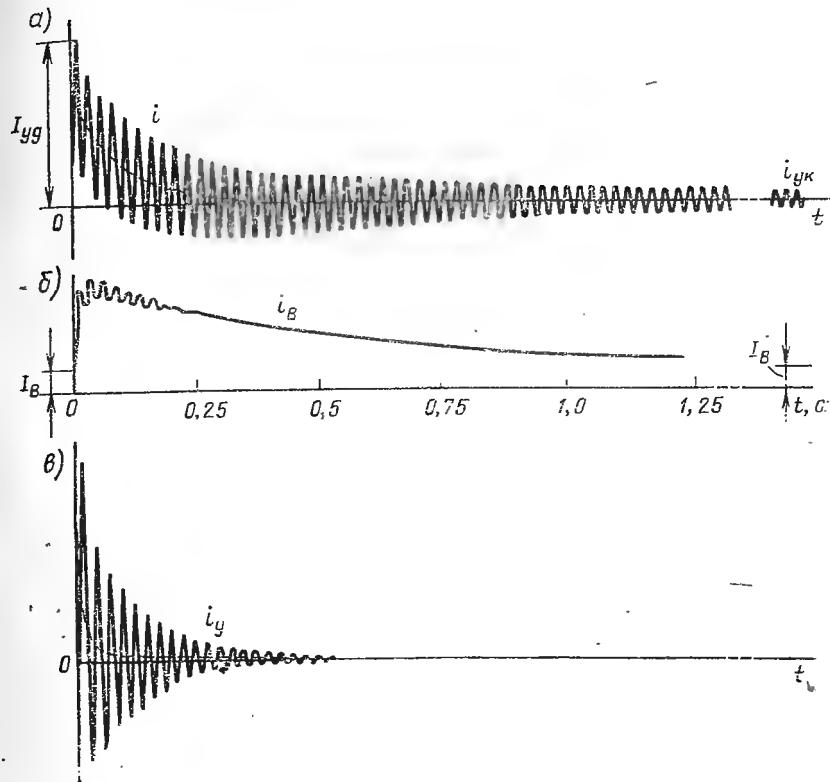


Рис. 33.5. Токи короткого замыкания

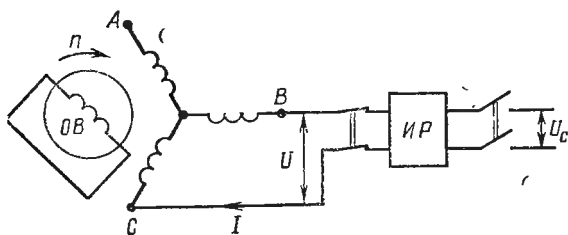


Рис. 33.6. Схема для определения параметров  $x_d''$  и  $x_q''$  опытным путем



имеет усложнительной обмотки, то вместо сверхпереходных сопротивлений  $x_d''$  и  $x_q''$  получим переходные —  $x_d'$  и  $x_q'$ . Полученные значения параметров являются приближенными, так как при неподвижном роторе действие высших гармонических несколько иное, чем при вращающемся роторе.

**Действующие значения токов.** При расчетах иногда пользуются выражениями для действующих (среднеквадратичных) значений тока, которые находятся путем деления соответствующих амплитуд на  $\sqrt{2}$ . Так как амплитуды свободного тока затухают с течением времени, то и действующие значения токов будут убывать вместе с ними. Для начальных значений при  $t=0$  и  $\alpha=0$  можно написать  $I_{пз}'' = I_{п\max}''/\sqrt{2} = E_0/x_d''$ ;  $I_{а3} = E_0/x_d''$ ;  $I_{пз}' = I_{п\max 3}'/\sqrt{2} = E_0/x_d'$ ;  $I_{y3} = E_0/x_d$ , где индекс 3 — трехфазное короткое замыкание.

**Несимметричные короткие замыкания.** Применяя метод симметричных составляющих, можно получить для начальных ( $t=0$ ) действующих значений при двухфазном коротком замыкании:

$$I_{п2}'' = I_{п\max 2}''/\sqrt{2} = \sqrt{3} E_0'(x_d' + x_2), \quad I_{п2}' = I_{п\max 2}'/\sqrt{2} = \\ = \sqrt{3} E_0'(x_d' + x_2)$$

и при однофазном:

$$I_{п1}'' = I_{п\max 1}''/\sqrt{2} = 3E_0'(x_d' + x_2 + x_0), \quad I_{п1}' = I_{п\max 1}'/\sqrt{2} = \\ = 3E_0'(x_d' + x_2 + x_0),$$

где  $x_2$  и  $x_0$  — индуктивные сопротивления обратной и нулевой последовательности.

Формулы могут быть получены из соответствующих формул установившегося режима путем замены  $x_d$  на  $x_d''$  или  $x_d'$ , чем учитывается, что прямое поле обмотки статора индуцирует э. д. с. в обмотках ротора только при переходных процессах. Так как обратное и пульсирующее поля статора индуцируют э. д. с. в обмотках ротора в неустановившемся и установившемся режиме, то параметры  $x_2$  и  $x_0$  неизменны в том и другом случае. Обозначив через  $\nu$  вид короткого замыкания ( $\nu=3, 2, 1$ ), можем написать для действующего значения тока к. з. при  $\alpha=0$ :

$$\sqrt{I_{п\nu}''^2 + I_{а\max \nu}^2} = \sqrt{I_{п\nu}''^2 + (\sqrt{2} I_{п\nu}')^2} = 1,73 I_{п\nu}' \quad (33.8)$$

Разность между действующими значениями результирующего тока и его периодической составляющей  $1,73 I_{п\nu}' - I_{п\nu}'' = 0,73 I_{п\nu}''$  обусловлена наличием затухающей аperiodической составляющей.

Подсчитаем начальные ( $t=0$ ) и промежуточные ( $t \neq 0$ ) значения токов при различных видах ( $\nu=3, 2, 1$ ) к. з. Мы рассмотрели к. з., которым предшествовал х. х., когда  $I=0$  и э. д. с. равна  $E_0$ . Если к. з. произошло при номинальном напряжении  $U_{ном}$ , нагрузочном токе  $I$  и коэффициенте мощности  $\cos \varphi$ , то в расчетах вместо  $E_0$  принимают либо величину  $E_{в.ном} = 1,05 U_{ном}$ , либо  $E''_{в.ном} = U_{ном} +$

$+I x_d'' \sin \varphi$  при наличии успокоительной обмотки, а  $E'_{в.ном} = U_{ном} + I x_d' \sin \varphi$  при ее отсутствии.

Следует иметь в виду, что в турбогенераторах, не имеющих специально устроенной успокоительной обмотки, необходимо учесть вихревые токи, индуцированные в массивном роторе, приведя их к эквивалентной успокоительной обмотке. При к. з. в точках, удаленных от зажимов генератора, необходимо учесть сопротивление внешней цепи от зажимов генератора до точки к. з.

**Ударный ток короткого замыкания.** Ударным током называют наибольшее возможное при данном возбуждении вращающейся машины мгновенное значение тока якоря при внезапном к. з. на зажимах генератора. При частоте тока 50 Гц ударный ток возникает примерно через 0,01 с (половину периода) после к. з. (см. рис. 33.4 и 33.5), достигает значения  $I_{уд} = 2\sqrt{2} E_a / x_d'' = 2\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{ном} / x_d''$ . За первый полупериод успевает заметно затухнуть только апериодическая составляющая тока к. з., и вместо множителя 2 принимают ударный коэффициент, равный 1,8, т. е. величину ударного тока к. з.  $I_{уд} = 1,05 \cdot 1,8 U_{ном} / x_d''$ , или  $I_{уд} = 1,05 \cdot 1,8 U_{ном} / x_d'$ . Значение ударного тока к. з. больше в машинах с успокоительной обмоткой, так как  $x_d'' < x_d'$ . Характерной величиной является кратность ударного тока к. з., которая равна отношению ударного тока к амплитуде номинального тока:

$$I_{уд} / (\sqrt{2} I_{ном}) = 1,05 \cdot 1,8 U_{ном} / (I_{ном} x_d'') = 1,05 \cdot 1,8 / x_d''^*$$

Согласно ГОСТ 183—66 кратность ударного тока не ограничивается, и синхронные машины должны выдерживать ударный ток к. з. при напряжении х. х., равном 105% номинального.

Нагрев обмоток, вызванный неустановившимися токами, относительно невелик и представляет опасность в том случае, когда ток установившегося к. з. превосходит номинальное значение и к. з. долго не устраняется (отключается автоматически через 3—4 с и в течение этого времени перегрев обмоток не успевает достигнуть опасных значений). Большую опасность представляют внутренние к. з. части витков, когда замкнута, например при пробое изоляции, небольшая часть витков; при небольшом числе этих витков ток в них достигает большой величины, долго не затухает, изоляция прогорает и происходит замыкание короткозамкнутой секции на корпус машины.

Токи к. з. вызывают электродинамические силы, во много раз превосходящие их величину при установившемся режиме. Эти силы представляют опасность для лобовых частей обмотки якоря, в особенности для быстроходных машин, имеющих длинные лобовые части, которые должны быть надежно укреплены с учетом величины ударного тока. Токи к. з. также создают большие вращающие моменты, мгновенные значения которых могут превзойти номинальный момент в десять раз, что должно быть учтено при проектировании машин. Одним из средств уменьшения размеров аварий при к. з. служит так называемое «гашение поля». Оно заключается

в быстрое уменьшении тока возбуждения путем включения в цепь возбуждения активного сопротивления с последующим отключением ее от возбудителя. Скорость спадания поля должна быть подобрана так, чтобы избежать опасных перенапряжений на обмотке возбуждения. В мощных машинах обмотку якоря можно выполнить в виде двух обмоток, электрически несвязанных, причем каждая обмотка работает на свою нагрузку. Вследствие этого аппаратуру можно рассчитать на половину тока всего генератора.

## Глава 34

### ВОЗБУЖДЕНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

#### § 34.1. Основные сведения

Синхронные генераторы выполняют с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

При независимом или постороннем возбуждении для питания обмотки возбуждения генератора необходим источник энергии постоянного либо переменного тока с выпрямительным устройством. Характерным здесь является независимость н. с. обмотки возбуждения от режима работы генератора. Источник постоянного тока, непосредственно питающий обмотку возбуждения генератора, называется *возбудителем*.

Генераторы самовозбуждающиеся, или с собственным возбуждением, не требуют постороннего источника энергии для возбуждения магнитного потока. Исходной энергией в них для возбуждения служит электрическая энергия в цепи якоря машины. Характерным для этих машин является использование остаточного магнетизма для самовозбуждения, а также зависимость н. с. обмотки возбуждения от режима работы генератора.

В качестве возбудителя используется либо генератор постоянного тока, либо ионные или полупроводниковые выпрямители. Особое место занимают генераторы с постоянными магнитами, не имеющие обмотки возбуждения. Такие генераторы можно условно отнести к самовозбуждающимся, так как они после намагничивания не нуждаются в постороннем источнике энергии, а н. с., развиваемая постоянными магнитами, зависит от режима работы генератора.

Схемы возбуждения помимо возбудителя могут содержать еще вспомогательные машины переменного и постоянного тока, действующие в качестве подвозбудителей. Совокупность возбудителя, вспомогательных машин и регулирующих устройств составляет *систему возбуждения*. От современных систем возбуждения требуют, чтобы они были надежны и экономичны, допускали регулирование напряжения возбуждения в необходимых пределах и обеспечивали быстрое увеличение напряжения возбуждения (форсирование возбуждения) при изменениях нагрузки и аварийных режимах.

Для выполнения этих требований системы возбуждения должны иметь достаточно высокий «потолок» напряжения, т. е. отношение верхнего предела напряжения возбудителя  $U_{\text{в max}}$  к номиналь-

ному напряжению возбуждения  $U_{в.ном}$  синхронной машины называют кратностью форсирования  $k_{фор} = U_{в.мах}/U_{в.ном}$ . Кроме этого, системы возбуждения должны обеспечивать достаточную скорость нарастания напряжения возбуждения при форсировании  $v_u$ . В соответствии с ГОСТ 183—66 турбогенераторы и компенсаторы должны иметь  $k_{фор} \geq 2,0$  и  $v_u \geq 1,3 U_{в.ном}$  в секунду; гидрогенераторы  $k_{фор} \geq 1,8$  и  $v_u \geq 1,3 U_{в.ном}$  в секунду. Для сверхмощных гидрогенераторов, работающих на дальние линии электропередачи,  $k_{фор} = 3 \div 4$ , а  $v_u < 10 U_{в.ном}$  в секунду.

## § 34.2. Генераторы с независимым возбуждением

Системы независимого возбуждения нашли широкое применение. Основная их ценность состоит в том, что возбуждение синхронной машины не зависит от режима электрической сети, в которой работает машина.

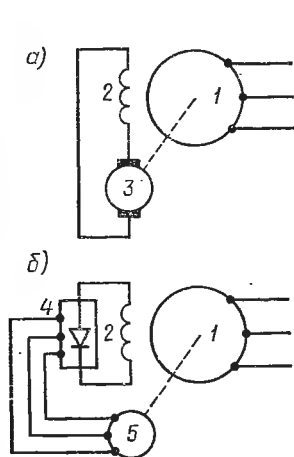


Рис. 34.1. Принципиальные схемы независимого возбуждения синхронных машин

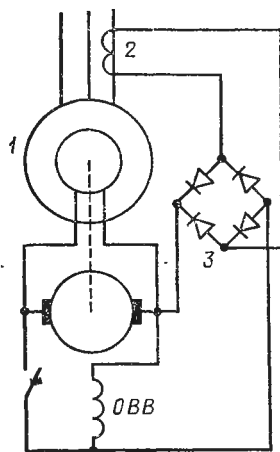


Рис. 34.2. Принципиальная схема компаундирования возбуждения синхронного генератора

Схема независимого возбуждения с электромашинным возбудителем, представляющим собой генератор постоянного тока, изображена на рис. 34,1, а. Здесь обмотка возбуждения 2 синхронного генератора 1 питается от генератора постоянного тока 3. На рис. 34.1, б представлена принципиальная схема независимого возбуждения, в которой в качестве возбудителя используется ионный или полупроводниковый преобразователь 4, получающий питание от вспомогательного синхронного генератора 5, установленного на валу основного синхронного генератора 1. Схемы с электромашинным возбудителем применяют на гидро- и турбогенераторах мощностью до 100 000 кВт и компенсаторах мощностью до 30 000 кВт·А.

Системы независимого возбуждения, обладающие быстрым действием, т. е. определенной скоростью нарастания напряжения и кратностью форсирования напряжения возбуждения, повышают статическую и динамическую устойчивость электрических станций.

Хорошим средством повышения устойчивости синхронного генератора с одновременным автоматическим регулированием напряжения в ссти является компаундирование возбуждения синхронных генераторов, получившее широкое распространение. Термин компаундирование обозначает автоматическое регулирование тока возбуждения синхронной машины в зависимости от тока якоря. На

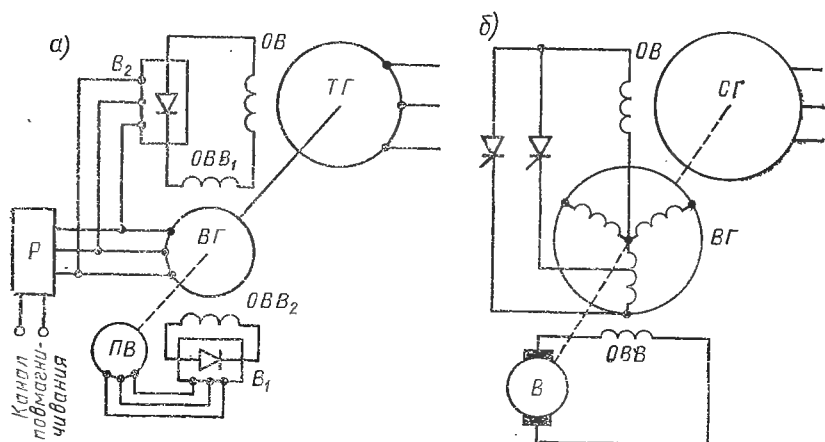


Рис. 34.3. Принципиальные схемы независимого возбуждения с полупроводниковым (а) и ионным (б) выпрямителями

рис. 34.2 показана принципиальная схема компаундирования возбуждения синхронного генератора 1. Здесь обмотка возбуждения ОВВ возбудителя получает дополнительное питание от трансформатора тока 2, включенного в линейный провод синхронного генератора через выпрямитель 3, соединенный по мостовой схеме. При соответствующей настройке схема обеспечивает постоянство напряжения, реагируя на изменения нагрузочного тока синхронного генератора. Для улучшения работы схем компаундирования их иногда дополняют устройствами, которые получили название корректоров напряжения — электронных, электромагнитных или электромеханических.

Недостатки системы независимого возбуждения с электромагнитным возбудителем связаны с самим возбудителем. У (гидрогенераторов) тихоходных машин из-за инерционности в электромагнитном отношении возбудителя система возбуждения имеет ограниченное быстроедействие. У быстроходных машин (турбогенераторов) надежность работы возбудителя снижается вследствие вибрации и тяжелых условий коммутации. Для сверхмощных турбогенераторов, требующих большую мощность возбуждения, вы-

полнить электромашинный возбудитель на большую частоту вращения по условиям коммутации становится невозможным.

Таким образом, компаундирование возбуждения синхронных генераторов применяют при относительно медленно происходящих процессах в системе и для синхронных генераторов мощностью до 100 000 кВт. Там же, где требуется наибольшее быстродействие системы возбуждения при значительном потолке напряжения, применяют схемы возбуждения с полупроводниковыми и ионными выпрямителями.

Принципиальная схема системы независимого возбуждения с полупроводниковым выпрямителем показана на рис. 34,3, а. Здесь на валу турбогенератора *ТГ* помещены вспомогательный синхронный генератор *ВГ* (индукторная машина повышенной частоты) и подвозбудитель *ПВ* (машина с постоянными магнитами). Вспомогательный генератор имеет две обмотки возбуждения: одна *ОВВ<sub>1</sub>* включена последовательно с обмоткой возбуждения турбогенератора *ОВ* и дает компаундирующий эффект; другая *ОВВ<sub>2</sub>* получает независимое питание от *ПВ* через выпрямитель *В<sub>1</sub>*. Напряжение *ВГ* выпрямляется полупроводниковым выпрямителем *В<sub>2</sub>* и регулируется при помощи реактора с подмагничиванием *Р*. В режиме нормального возбуждения обмотка статора *ВГ* нагружена дополнительным реактивным током, потребляемым реактором. Изменяют ток в реакторе путем автоматического регулирования степени его подмагничивания. Эта система возбуждения обеспечивает скорость нарастания напряжения возбуждения  $v_u$  не менее  $4U_{в.ном}$  в секунду.

Более быстродействующая система независимого возбуждения — с ионным выпрямителем (рис. 34,3, б). На одном валу с гидрогенератором *СГ* помещен вспомогательный синхронный генератор *ВГ*, имеющий трехфазную обмотку с отпайками. Обмотка возбуждения *ВГ* питается от электромашинного возбудителя *В*. Ионные вентили *В<sub>1</sub>* и *В<sub>2</sub>* собраны по мостовым схемам преобразования. На стороне переменного тока они включены на разные напряжения, а на стороне выпрямленного напряжения — параллельно. Возбуждение *СГ* в нормальном режиме обеспечивает группа вентиля *В<sub>1</sub>*, включенных на низкое напряжение *ВГ*, а режим форсирования возбуждения — вентили *В<sub>2</sub>*, работающие от полного напряжения *ВГ*. Рассмотренная система возбуждения имеет предельное быстродействие и дает возможность получить  $k_{фор}=4$  и более.

### § 34.3. Генераторы с самовозбуждением

Преимущество самовозбуждающихся синхронных генераторов — то, что они не требуют дополнительного источника энергии для питания обмотки возбуждения, имеют значительно меньшие размеры, массу и стоимость по сравнению с генераторами независимого возбуждения. Наибольшие применения получили маломощные самовозбуждающиеся генераторы с системами самовозбужде-

ния, в которых используют механические или полупроводниковые выпрямители. К недостаткам систем самовозбуждения относится меньшая надежность, так как в этом случае питание обмотки возбуждения зависит от режима работы сети переменного тока.

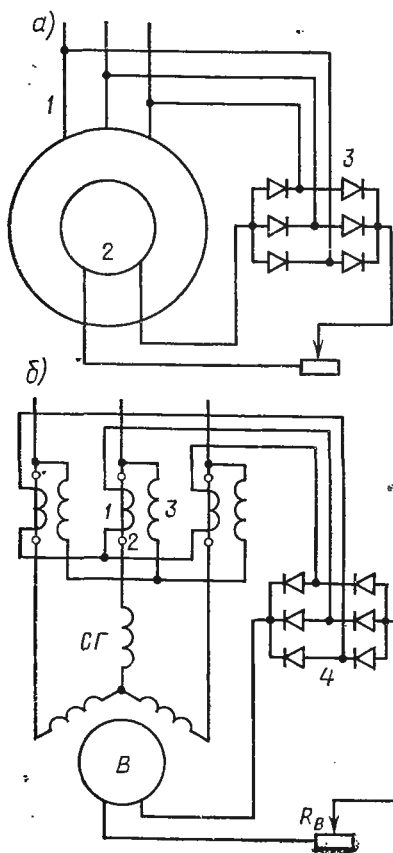


Рис. 34.4. Принципиальная схема самовозбуждающегося синхронного генератора с полупроводниковым выпрямителем (а) и полупроводниковым выпрямителем и трехобмоточным стабилизирующим трансформатором (б)

На рис. 34.4, а изображена принципиальная схема самовозбуждения синхронного генератора с полупроводниковым выпрямителем. Здесь обмотку возбуждения синхронного генератора 2 через выпрямитель 3 присоединяют к зажимам статора 1. При напряжении свыше 230 В выпрямитель получает питание через понижающий трансформатор. Процесс самовозбуждения происходит за счет остаточного магнитного потока, как и в генераторах постоянного тока. Применяют схемы самовозбуждения синхронных генераторов с полупроводниковыми выпрямителями и трехобмоточным стабилизирующим трансформатором для поддержания постоянства напряжения генератора при изменении нагрузки. На рис. 34.4, б показано, что обмотка трансформатора 3 подключена параллельно нагрузке, обмотка 1 — последовательно, выпрямитель 4 — к третьей обмотке трансформатора 2. При увеличении нагрузки генератора ток, проходящий по обмотке 1, растет и повышает магнитный поток трансформатора, э. д. с. обмотки 2 и соответственно ток возбуждения, в результате чего получится стабилизация напряжения генератора при изменении нагрузки.

В последнее время широко применяют схемы самовозбуждения с управляемыми ионными выпрямителями. Эти схемы обеспечивают высокое быстродействие и значительную кратность форсирования. При надлежащем выборе параметров схемы самовозбуждения с управляемыми ионными выпрямителями по своим свойствам приближаются к схемам независимого возбуждения с ионными выпрямителями, рассмотренными ранее.

#### § 34.4. Синхронные индукторные машины

В синхронных машинах обычной конструкции частота индуцируемой э. д. с. зависит от числа полюсов и частоты вращения ротора. Так как число полюсов и частоту вращения нельзя увеличивать сколь угодно по конструктивным соображениям, то при повышенных частотах находят применение машины индукторного типа. Их выполняют двухстаторными с магнитным полем, замыкающимся вдоль оси машины (постоянно-полюсные), а генераторы — с магнитным полем, замыкающимся перпендикулярно оси машины (переменно-полюсные).

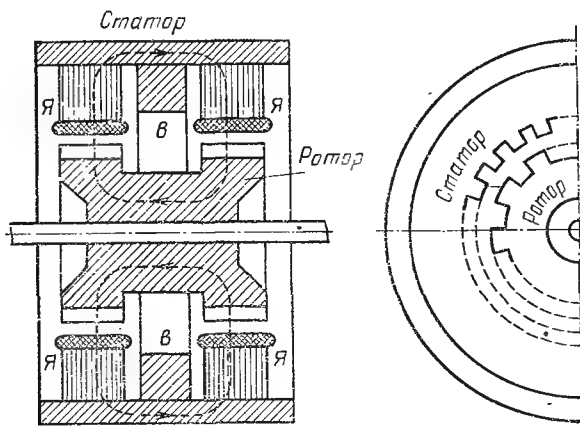


Рис. 34.5. Схема устройства постоянно-полюсной индукторной машины

Схема устройства постоянно-полюсного генератора изображена на рис. 34.5. Обмотка якоря  $я$  и обмотка возбуждения  $в$  помещены на статоре, ротор не имеет обмотки. Обмотка возбуждения выполнена в виде одной цилиндрической катушки. Обмотку переменного тока укладывают на зубцах (выступах) статора в виде катушек, соединяемых последовательно. Число зубцов статора вдвое больше числа зубцов ротора. Ток обмотки возбуждения создает магнитное поле, замыкающееся в сердечниках статора и ротора вдоль оси машины. При вращении ротора магнитное сопротивление между ротором и статором не претерпевает изменений, следовательно, также постоянен магнитный поток. Поэтому статор и ротор могут быть сплошными.

В обмотке переменного тока индуцируется э. д. с. за счет того, что магнитный поток, пронизывающий зубец статора, изменяется от наибольшего значения  $\Phi_{\max}$  в момент, когда под центром катушки (или зубца) находится зубец ротора, до наименьшего значения  $\Phi_{\min}$  в момент, когда под центром катушки находится паз ротора. Зубцы статора подвергаются действию переменного магнитного поля и собираются из изолированных стальных пластин. Кривые



изменения во времени магнитного потока, сцепленного с какой-либо катушкой обмотки статора и э. д. с., индуцируемой в этой катушке, показаны на рис. 34.6. Из приведенного графика видно, что при повороте ротора на одно зубцовое деление э. д. с. в обмотке статора претерпевает один период изменения и частота э. д. с.  $f = zn/60$ , где  $z$  — число зубцов ротора;  $n$  — частота вращения.

При повышенных частотах машина индукторного типа имеет преимущество перед синхронной машиной обычной конструкции.

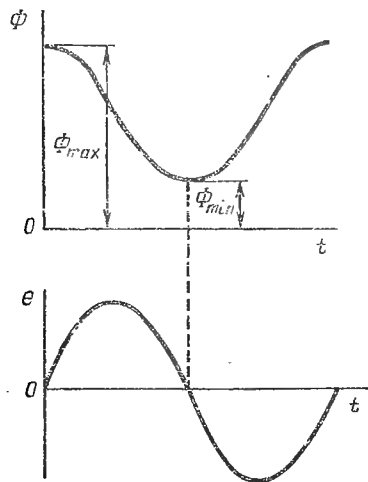


Рис. 34.6. Кривые изменения магнитного потока и э. д. с. в катушке обмотки статора машины индукторного типа

В последней одному периоду изменения э. д. с. обмотки статора соответствует поворот ротора на два полюсных деления (два зубца). Поэтому для получения э. д. с. высокой частоты ротор машины индукторного типа должен иметь вдвое меньшее число зубцов, чем ротор машины обычной конструкции. Кроме того, ротор машины индукторного типа не имеет обмотки возбуждения, что дает возможность уменьшить полюсное деление и допускать большие окружные скорости по сравнению с обычными машинами.

В переменнo-полюсных индукторных машинах обмотки якоря и возбуждения помещают на полюсах статора, ротор так же, как и у машин постоянно-полюсных, зубчатый и не имеет обмотки. Магнитное поле, созданное током обмотки возбуждения, направлено перпендикулярно оси машины. При вращении ротора

магнитный поток не претерпевает изменение так же, как и в ранее рассмотренном типе машины.

Принципиальное устройство переменнo-полюсной машины изображено на рис. 34.7. Обмотка якоря охватывает несколько зубцов статора, а обмотка возбуждения — вдвое большее число зубцов. Ширина пазов, в которые укладывают обмотки, равна зубцовому шагу, благодаря чему магнитное сопротивление на дуге окружности, охватываемой обмоткой возбуждения, остается неизменным, так как в момент, когда половина зубцов статора находится против зубцов ротора, другая половина — против пазов. Поэтому переменной э. д. с. в обмотке возбуждения не возникает. При одинаковом направлении намотки э. д. с. соседних катушек обмотки якоря имеют различное направление и эти катушки соединяют встречно.

Если изменение магнитного потока от наибольшего значения  $\Phi_{\max}$  до наименьшего  $\Phi_{\min}$  происходит синусоидально, то действующее значение э. д. с. машины индукторного типа  $E = 2,22f\omega(\Phi_{\max} -$

— $\Phi_{\min}$ ), где  $f$  — частота тока;  $\omega$  — общее число витков обмотки якоря. В действительности переменная составляющая магнитного потока не синусоидальна и зависит от коэффициента формы кривой  $k$ :

$$E = 2kf\omega(\Phi_{\max} - \Phi_{\min}).$$

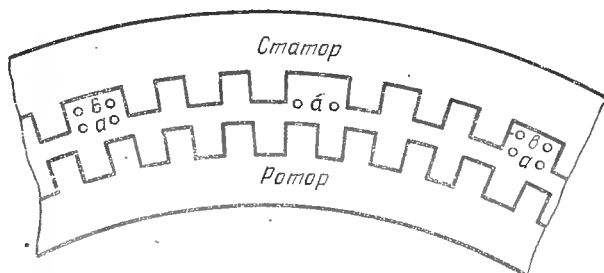


Рис. 34.7. Схема устройства переменного полюсной индукторной машины

## Глава 35

### НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН

#### § 35.1. Нагревание синхронных машин

Одним из основных параметров, определяющих номинальную мощность машины, — температура нагрева различных ее частей, которая не должна превышать допустимой для данных материалов, из которых изготовлены указанные части. Температура нагрева их зависит от величины потерь  $\Sigma P$  и интенсивности охлаждения машины. Под *рабочей температурой машины* (ГОСТ 183—66) понимают практически установившуюся температуру какой-либо части машины при ее номинальном режиме и неизменной температуре окружающей среды.

*Превышение температуры* представляет собой разность между температурой какой-либо части машины и температурой окружающей среды. При переходе машины из нерабочего состояния к режиму постоянной нагрузки температура отдельных ее частей постепенно повышается и через некоторое время достигает установившегося значения. Под *постоянной времени нагревания* (ГОСТ 183—66) понимают время, течение которого превышение температуры машины при ее нагревании с отдачей тепла в окружающую среду, изменяясь от нуля по экспоненциальному закону, достигает значения, равного 0,632 установившегося.

Длительно существующие установившиеся значения температур различных частей машины не должны превышать допустимых величин. Практически установившуюся температуру машины по ГОСТ 183—66 называют *температура машины*, изменение которой при неизменных нагрузке и температуре окружающей среды не превышает заданной величины. Чрезмерное повышение температуры

сверх допустимой величины отражается прежде всего на изоляции машины, так как она теряет свои изолирующие свойства, а также оказывает влияние на механические условия работы той или иной части машины (коллектор, контактные кольца, подшипники и др.).

ГОСТ 183—66 предписывает, что рабочая температура для обмоток статора, имеющих изоляцию класса А, должна быть  $+105^{\circ}\text{C}$ , для обмоток статора и ротора, имеющих изоляцию класса В,  $+130^{\circ}\text{C}$ . Рабочая температура частей машины зависит не только от нагрузки машины, но и от температуры окружающей среды, которая согласно ГОСТ 183—66 принимается равной для турбогенераторов и компенсаторов  $+40^{\circ}\text{C}$ , а для гидрогенераторов и синхронных двигателей  $+35^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, допустимая величина превышения температуры зависит от класса изоляции и температуры окружающей среды. Например, для обмотки турбогенератора с изоляцией класса В допустимая величина превышения температуры —  $+90^{\circ}\text{C}$ , для обмотки гидрогенератора с изоляцией того же класса —  $+95^{\circ}\text{C}$ , для коллекторов, контактных колец сердечников, соприкасающихся с обмотками,  $80^{\circ}\text{C}$ .

Увеличение превышения температуры активных частей машины, а следовательно, увеличение ее мощности в том случае, когда температура охлаждающей среды становится меньше нормальной, допускается только в весьма ограниченных размерах. Так, например, для гидрогенераторов при снижении температуры окружающей среды с  $35$  до  $30^{\circ}\text{C}$  допускается увеличение мощности на  $3,75\%$  от номинальной, а при снижении температуры с  $30$  до  $25^{\circ}\text{C}$  — только на  $1,25\%$  от номинальной мощности. При уменьшении температуры окружающей среды ниже  $25^{\circ}\text{C}$  повышение мощности не допускается.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что чем меньше допустимая рабочая температура частей машины, тем больше срок службы изоляции, а следовательно, и самой машины, но при этом она имела бы большие размеры и высокую стоимость. Наоборот, чем больше допустимая рабочая температура частей машины, тем она меньше, но ее надежность и срок службы изоляции уменьшаются. Так, например, изоляция класса А может длительно работать в течение  $16\div 20$  лет при температуре  $105^{\circ}\text{C}$ , но уже при температуре  $150^{\circ}\text{C}$  время износа сокращается примерно до 1,5 месяца. Применение новых изоляционных материалов, разработанных в последнее время, повысило допустимую рабочую температуру частей машины до  $180^{\circ}\text{C}$  (изоляция класса Н). Такая высокая температура позволяет резко уменьшить габариты и вес машины.

Контролируют температуру наиболее важных частей турбогенераторов, гидрогенераторов, компенсаторов и мощных синхронных двигателей (обмотки и сердечники статоров, подшипники), а также охлаждающей среды с помощью электрических термометров сопротивления и термометрических сигнализаторов.

Нагревание частей машины будет тем сильнее, чем хуже охлаждается машина. Поэтому с вопросами срока службы машины, кроме повышения теплостойкости изоляции, неразрывно связаны воп-

росы ее охлаждения. По условиям механической прочности размеры синхронной машины имеют определенные пределы. Создание сверхмощных генераторов стало возможным лишь в результате увеличения удельных электромагнитных нагрузок — плотностей тока в обмотках машин. При этом для сохранения температур их активных частей в допустимых пределах интенсивность охлаждения должна быть тем эффективнее, чем больше номинальная мощность машины.

## § 35.2. Охлаждение синхронных машин

**Общие сведения.** По способу охлаждения синхронные машины согласно ГОСТ 183—66 подразделяют на следующие типы:

1. Электрическая машина с естественным охлаждением, у которой движение охлаждающей среды создается за счет конвекции и вращения ее частей, не имеющих специальных приспособлений для увеличения скорости движения охлаждающей среды.

2. Электрическая машина с искусственным охлаждением, у которой при помощи специальных приспособлений или вследствие особых условий работы достигается увеличение скорости движения охлаждающей среды.

3. Электрическая машина с искусственным жидкостным охлаждением, у которой охлаждающей средой является жидкость. В случае охлаждения жидкостью части машины к термину добавляется название охлаждаемой части. Например, «электрическая машина с жидкостным охлаждением статора».

4. Электрическая машина с самовентиляцией, охлаждение которой осуществляется вентилирующими приспособлениями, вращающиеся части которых связаны с вращающимися частями машины. В зависимости от направления, в котором движется охлаждающая среда, различают вентиляцию радиальную и аксиальную. Радиальная вентиляция требует устройства радиальных вентиляционных каналов, что увеличивает размеры машины. Однако эта система дает минимальные потери на вентиляцию и обеспечивает относительно равномерную теплоотдачу частей машины в осевом и радиальном направлениях. При аксиальной вентиляции часть машины, куда поступает холодный воздух, охлаждается лучше, чем остальная часть, куда поступает уже нагретый воздух.

5. Электрическая машина с независимой (разомкнутой или замкнутой) вентиляцией, имеющая вентиляционные устройства, вращающиеся части которых не связаны с вращающимися частями машины:

а) электрическая машина с разомкнутой системой вентиляции, у которой охлаждающий воздух проходит через внутреннее пространство машины. Прошедший через машину воздух больше в нее не возвращается (рис. 35.1, а). Чтобы предупредить загрязнение машины пылью, содержащейся в поступающем воздухе, на входе он очищается посредством фильтра.

б) электрическая машина с замкнутой системой вентиляции, у которой охлаждающий воздух (или газ) или жидкость циркулируют по замкнутой системе через внутреннее пространство машины и специальный охладитель. Принципиальная схема замкнутой системы охлаждения показана на рис. 35.1, б. Для питания охладителей применяется техническая вода. При замкнутой системе охлаждения исключается возможность засорения частей машины пылью. При других видах охлаждающей среды она является единственно возможной.

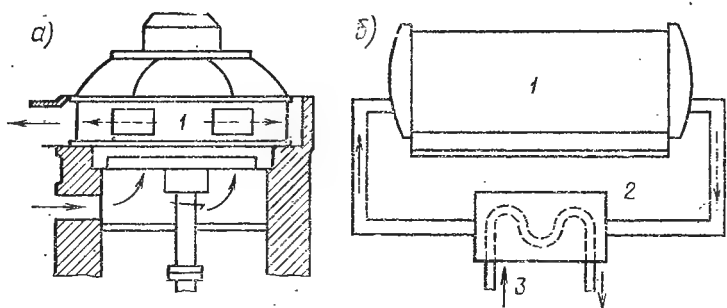


Рис. 35.1. Принципиальные схемы с разомкнутой (а) и замкнутой (б) системами:

1 — синхронная машина; 2 — охладитель; 3 — направление движения воды в охладителе

6. Электрическая машина с непосредственным охлаждением, охлаждающая среда которой отводит тепло непосредственно от тех частей, в которых это тепло выделяется. В случае непосредственного охлаждения части машины к термину добавляется название охлаждаемой части. Например, «электрическая машина с непосредственным охлаждением обмотки статора». В этом случае охлаждающая среда непосредственно омывает проводники обмоток статора или ротора, унося тепло, выделяющееся в них, а остальные части машины охлаждаются через их естественные поверхности.

Электромашиностроительные заводы в каталогах и инструкциях по эксплуатации применяют еще один термин для определения охлаждающей системы: косвенное и смешанное охлаждение. При косвенном охлаждении тепловой поток от проводника обмотки должен пройти через слой изоляции, прежде чем он достигнет поверхности теплоотдачи и отведется охлаждающим агентом (воздухом или газом). При смешанном охлаждении одна из обмоток статора или ротора охлаждается косвенно, а другая — непосредственно.

В качестве охлаждающей среды (охлаждающего агента) в синхронных машинах применяют воздух, водород, воду и масло. Воздух используют в системах косвенного охлаждения (гидрогенераторов, двигателей, турбогенераторов и компенсаторов ограниченной мощности). Водород в замкнутых системах вентиляции позволяет

увеличить мощность машины без увеличения ее размеров за счет более интенсивной теплопередачи, так как теплоемкость водорода в 14 раз, теплопроводность в 6, 7 раз больше, чем воздуха, и коэффициент теплопередачи от охлаждаемой поверхности к водороду в 1,4 раза больше, чем к воздуху. Плотность водорода составляет примерно 10% от плотности воздуха, вследствие чего вентиляционные потери и потери на трение ротора об охлаждающую среду, которые в быстроходных машинах при воздушном охлаждении относительно велики, уменьшаются в 10 раз. Такое уменьшение потерь дает заметное увеличение к. п. д. (порядка 0,8%). Водородное охлаждение также уменьшает окисление изоляции. Наряду с указанными преимуществами водородное охлаждение требует усложнения конструкции, так как должна быть обеспечена герметичность корпуса. При водородном охлаждении в замкнутой системе необходимо поддерживать избыточное давление порядка 0,05 ат, что должно исключить возможность попадания в машину воздуха и образования внутри взрывоопасной газовой смеси.

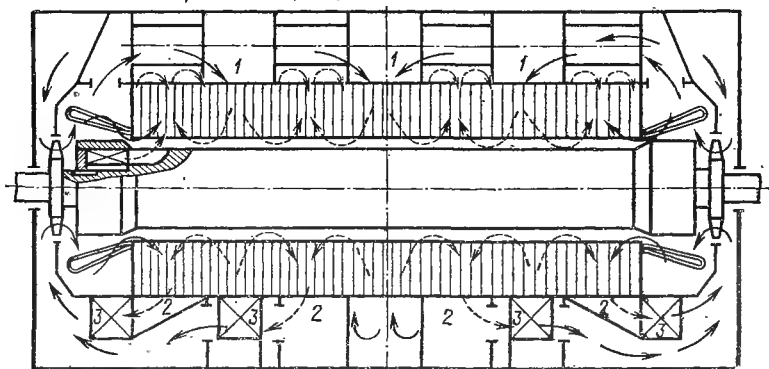
Создание генераторов свыше 150 000 кВ·А потребовало более интенсивного охлаждения. При повышении давления водорода пропорционально увеличивается теплоемкость и улучшается теплоотдача с охлаждаемой поверхности. Однако повышение давления целесообразно лишь до некоторого предела, ибо затем оно не дает положительных результатов, так как в этом случае уменьшается только перепад температуры от охлаждающей поверхности к охлаждающему газу, а температурный перепад в изоляции обмотки и по участкам зубцов остается неизменным. Поэтому превышение температуры обмоток статора и ротора в этом случае уменьшается незначительно, а трудности по герметизации корпуса возрастают и увеличиваются потери на трение и вентиляцию.

**Охлаждение турбогенераторов.** Охлаждаются генераторы по замкнутому циклу. В зависимости от их мощностей и исполнения применяют различные системы охлаждения: косвенное воздушное охлаждение статора и ротора с радиальной или аксиальной схемой вентиляции (до 30 000 кВ·А); косвенное водородное охлаждение статора и ротора с радиальной или аксиальной схемой вентиляции (30 000—150 000 кВ·А); смешанное водородное охлаждение статора и непосредственное обмотки ротора (60 000—200 000 кВ·А); непосредственное водородное охлаждение обмоток статора и ротора (200 000—300 000 кВ·А); непосредственное водяное охлаждение обмотки статора и водородное охлаждение обмотки ротора (200 000—300 000 кВ·А); непосредственное водяное охлаждение обмоток статора и ротора (200 000—1 000 000 кВ·А).

На рис. 35.2 приведена схема радиальной самовентиляции турбогенератора при косвенном охлаждении. Два вентилятора, расположенных на торцах ротора, прогоняют холодный газ (воздух или водород) через лобовые части обмотки статора в несколько камер 1, размещенных вдоль оси машины и охватывающих снаружи сердечник статора. Из них газ устремляется через вентиляционные каналы статора в воздушный зазор машины и затем в обратном

направлении — в камеры 2. Здесь движется уже нагретый газ. Далее он проходит через газоохладители 3, где охлаждается, и снова поступает к вентиляторам машины. Лобовые части обмотки ротора охлаждаются струей газа, которая от вентиляторов направляется в специальный канал под бандажным кольцом. Подобную схему самовентиляции называют *радиальной многоструйной*. При охлаждении воздухом охладители устанавливают внутри фундамента, а при охлаждении водородом — в корпусе машины.

*Разрез по вертикальной плоскости*



*Разрез по горизонтальной плоскости*

Рис. 35.2. Схема радиальной самовентиляции турбогенератора

Помимо радиальной применяют также *аксиальную* схему вентиляции. В этом случае холодный водород с помощью компрессора поступает с одной стороны машины в осевые каналы в сердечнике статора и выходит нагретым с другой стороны. Во внутренние каналы сердечника ротора холодный газ подается с обоих торцов ротора и нагретым выходит в зазор в средней части турбогенератора.

В турбогенераторах (ТГВ-200, ТГВ-200М, ТГВ-300) с непосредственным водородным охлаждением обмоток статора в качестве вентиляционных каналов в стержнях применяют специальные изолированные трубки из немагнитной стали с высоким омическим сопротивлением, расположенные между двумя столбцами элементарных проводников. Элементарный проводник образуется наложением двух медных полос специального профиля, при этом в середине получается вентиляционный канал. В ротор водород входит через боковые отверстия в меди в зоне лобовых частей и по каналам внутри проводников движется к центральной зоне, где выбрасывается в воздушный зазор через вертикальные вентиляционные каналы.

В турбогенераторах (ТГВ-200М, ТГВ-500, ТГВ-800) с непосредственным водяным (дистиллированная вода) охлаждением обмоток статора применяют элементарные медные проводники (сплошные и полые), которые имеют квадратную форму и круглое внутреннее отверстие. Вода к виткам обмотки ротора подводится через

специальное устройство, состоящее из герметичных и изоляционных элементов.

Головки стержней обмоток статора как при непосредственном водородном охлаждении, так и при водяном, надежно изолированы специальными колпачками на кремнийорганической резине.

Турбогенератор ТВМ-300 имеет непосредственное водомасляное охлаждение. Обмотка ротора охлаждается водой, а сердечник, обмотка статора и их конструктивные элементы погружены в масло.

\*Созданные в последнее время сверхмощные турбогенераторы типа ТГН-1000 и ТВВ-1200-2 имеют непосредственное водяное охлаждение обмоток статора и ротора, а сердечник и поверхность ротора охлаждаются водородом по замкнутому циклу.

**Охлаждение гидрогенераторов.** Охлаждение генераторов производится по замкнутому циклу. В зависимости от их мощностей и исполнения применяются различные системы охлаждения: в генераторах серии СВ, СВО, СГ, ВСГ мощностью 20 000—240 000 кВ·А — косвенное воздушное охлаждение статора и ротора с радиальной или аксиальной схемой вентиляции; в генераторах серии СВФ мощностью 128 000—530 000 кВ·А — непосредственное водяное охлаждение обмотки статора и косвенное форсированное воздушное охлаждение обмотки ротора; в генераторах серии СГК 20 000—45 000 кВ·А — непосредственное водяное охлаждение обмоток статора и ротора.

Гидрогенераторы серии СВФ имеют непосредственное водяное охлаждение обмотки статора и косвенное форсированное воздушное охлаждение обмотки ротора. С целью повышения эффективности охлаждения обмотки ротора ее поверхность многократно увеличена путем образования между витками или в самих витках катушек многочисленных каналов, по которым проходит охлаждающий воздух поперек витков катушек. Из радиальных каналов в обод ротора воздух подается в зазор между сердечниками и катушками полюсов, затем распределяется по параллельным каналам в катушках и выбрасывается в межполюсное пространство.

Капсульные гидрогенераторы мощностью 5670÷20 000 кВ·А имеют косвенное воздушное охлаждение с аксиальной схемой независимой вентиляции. Обычная радиальная схема самовентиляции, применяемая в гидрогенераторах, неприемлема для капсульных гидрогенераторов, так как требует значительного увеличения наружного диаметра корпуса статора. В связи с этим принята аксиальная схема независимой вентиляции. Специальный осевой компрессор с электродвигателем прогоняет воздух через охладитель и проходит через активные части гидрогенератора следующими параллельными путями: междуполюсное пространство, воздушный зазор, специальные щели в зубцах или вентиляционные трубки в стержнях обмотки и отверстия в спинке сердечника статора.

Капсульные гидрогенераторы серии СГК мощностью 20 000÷45 000 кВ·А имеют непосредственное водяное охлаждение обмоток статора и ротора. Водяное охлаждение обмоток статора у всех гидрогенераторов осуществляется принципиально так же, как у тур-



богенераторов. Катушки обмотки ротора выполняются из полых медных проводников. Катушка каждого полюса с помощью изоляционных шлангов присоединяется к двум кольцевым трубам — напорной и сливной, расположенным на периферии обода ротора. Увеличение подвода воды из внешней системы устанавливается на свободном конце вала.

**Охлаждение генераторов малой мощности.** Синхронные генераторы мощностью от десятков В·А до десятков кВ·А выполняют с естественным охлаждением. Вентиляция у них — симметричная радиальная, осуществляемая вентилирующим действием вращающегося явнополюсного ротора. Охлаждающий воздух поступает в генератор через окна в нижней части щитов и с помощью направляющих воронок подводится к индуктору, охлаждая таким образом активные части. Подогретый воздух отбрасывается к периферии и выходит наружу через окна в нижней части станины.

В синхронных генераторах мощностью 75—800 кВ·А применяется косвенное воздушное охлаждение с разомкнутой системой самовентиляции по аксиальной схеме. Воздух, охлаждающий машину, засасывается через отверстия в переднем щите и проходит к вентилятору, установленному на валу у заднего щита (крылья вентилятора могут крепиться с обеих сторон обода ротора) двумя потоками:

- 1) по междуполюсному пространству и зазору;
- 2) между катушками в лобовых частях обмотки статора и по каналам, образованным пакетом статора и станиной. Нагретый воздух выбрасывается наружу через окна в заднем щите.

Такую же систему охлаждения имеют двигатели аналогичной мощности.

**Охлаждение двигателей и компенсаторов.** Для воздушного охлаждения мощных синхронных двигателей (1250—8000 кВт) применяется согласная радиальная разомкнутая система самовентиляции. Охлаждающий воздух входит в междуполюсные окна ротора с обеих сторон машины, проходит через радиальные вентиляционные каналы сердечника статора и выбрасывается из машины через окна корпуса статора. В качестве встроенных напорных элементов в двигателях применяются ковшевые, центробежные и осевые вентиляторы.

В последнее время для увеличения надежности работы и снижения веса крупных тихоходных двигателей применяется встречная радиальная система вентиляции, в которой холодный воздух подается непосредственно в радиальные вентиляционные каналы статора из камеры корпуса.

В компенсаторах мощностью 10 000—30 000 кВ·А применяют косвенное воздушное охлаждение с замкнутой системой самовентиляции по радиальной схеме. Подводится охлаждающий воздух снизу машины с двух сторон, отводится через нижний раструб станины. В компенсаторах большой мощности применяют косвенное водородное охлаждение.

**КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
И ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ****Глава 36****ОДНОФАЗНЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА****§ 36.1. Принцип действия и устройство  
однофазного коллекторного двигателя  
переменного тока**

Выше было отмечено, что наиболее широкое применение нашли асинхронные двигатели, отличающиеся простотой конструкции и эксплуатации. Эти двигатели работают от сети переменного тока и не требуют сложных и дорогостоящих преобразовательных устройств, необходимых при использовании двигателей постоянного тока. Однако асинхронные двигатели не допускают экономичного изменения частоты вращения в широких пределах.

Коллекторные двигатели переменного тока, характеристики которых подобны характеристикам двигателей постоянного тока, имеют хорошие регулировочные и пусковые свойства. Недостатком коллекторных двигателей является их сравнительно высокая стоимость и ограниченная мощность (до 50—70 кВт), что объясняется трудными условиями коммутации.

Однофазные коллекторные двигатели малой мощности применяются в установках связи, автоматики и для бытовых целей.

Принципиально любой двигатель постоянного тока может работать от сети переменного тока, так как развиваемый двигателями вращающий момент, зависящий от произведения тока в якоре и магнитного потока полюсов ( $M = k\Phi I_a$ ), не меняет направления при одновременном изменении направления тока в якоре и магнитного потока полюсов.

Для создания достаточно большого вращающегося момента необходима одновременность изменения направления тока в якоре и магнитного потока полюсов, т. е. совпадение по фазе тока в якоре и потока полюсов.

В двигателе параллельного возбуждения такого совпадения по фазе обеспечить нельзя, так как магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, отстает от приложенного напряжения примерно на четверть периода (рис. 36.1, а). Считая ток в якоре чисто активным (вращающий момент создается активной составляющей

тока), видим, что ток в якоре и магнитный поток не совпадают по фазе, т. е. одновременно их изменения нет.

В двигателе последовательного возбуждения ток в якоре является одновременно и током возбуждения. Пренебрегая углом сдвига между током возбуждения и магнитным потоком, получим совпадение по фазе тока в якоре и магнитного потока (рис. 36.1, б), т. е. одновременность их изменения.

В конструктивном отношении коллекторные двигатели переменного тока имеют существенное отличие от машин постоянного тока. Магнитопровод статора коллекторного двигателя, имеющий обычно

Рис. 36.1. Векторные диаграммы коллекторных двигателей:

а — параллельного возбуждения; б — последовательного возбуждения

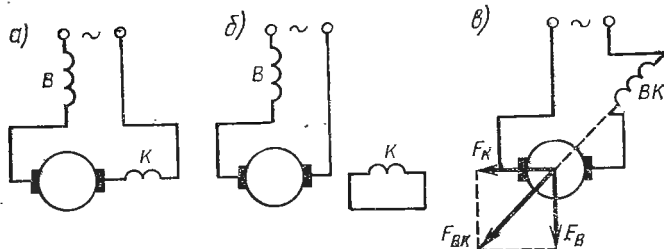
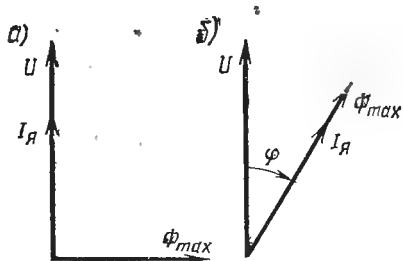


Рис. 36.2. Схема коллекторного двигателя последовательного возбуждения с компенсационной обмоткой

явнополюсную конструкцию, набирают из листовой стали для уменьшения потерь на вихревые токи. Поток реакции якоря создает э. д. с. самоиндукции, которая в сильной степени снижает коэффициент мощности. Для устранения действия реакции якоря на статоре коллекторного двигателя помещают компенсационную обмотку, магнитный поток которой направлен встречно потоку реакции якоря. Компенсационная обмотка  $K$  (рис. 36.2) может быть соединена с якорем последовательно (а), может иметь с якорем трансформаторную связь (б) и может быть помещена на статоре одна обмотка  $BK$  (в), являющаяся одновременно и обмоткой возбуждения и компенсационной.

Иногда применяют двигатели с трансформаторной связью статора и ротора (рис. 36.3), называемые индукционными или репульсионными коллекторными двигателями. Эти двигатели имеют неявнополюсный статор, набранный из листовой электротехнической

стали. Их применяют главным образом в бытовых установках, предназначенных для непосредственного присоединения к сети.

Помимо обмоток возбуждения и компенсационной на статоре коллекторного двигателя имеется обмотка дополнительных полюсов, предназначенная для улучшения коммутации.

При малых мощностях коллекторные двигатели делают универсальными, т. е. предназначенными для работы от сети переменного и постоянного тока.

Универсальные двигатели обычно выполняются без компенсацион-

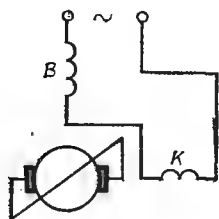


Рис. 36.3. Схема репульсионного коллекторного двигателя

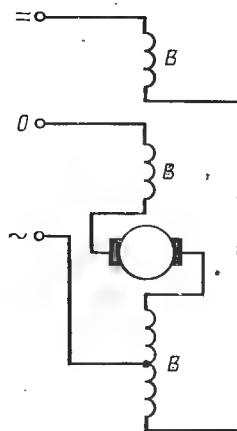


Рис. 36.4. Схема универсального коллекторного двигателя

ной обмотки (рис. 36.4). При работе от сети постоянного тока двигатель подключается зажимами 0 и =, а при работе от сети переменного тока — зажимами 0 и ∞. Таким образом, при работе на переменном токе число витков обмотки возбуждения значительно меньше, чем при работе на постоянном токе, так что коэффициент мощности оказывается сравнительно высоким, несмотря на отсутствие компенсационной обмотки.

## § 36.2. Векторная диаграмма однофазного коллекторного двигателя

Ток, протекающий в обмотке возбуждения, создает магнитный поток  $\Phi_b$ , а ток в якоре — магнитный поток  $\Phi_a$ . Эти магнитные потоки являются пульсирующими и сдвинуты в пространстве на  $\pi/2$ . Э. д. с., индуцируемая в обмотке вращающегося якоря пульсирующим магнитным полем  $e$ , определяется полным изменением магнитного потока во времени:

$$d\Phi/dt = \partial\Phi/\partial t + (\partial\Phi/\partial x)(dx/dt) = \partial\Phi/\partial t + (\partial\Phi/\partial x)v \text{ или } e = e_t + e_v,$$

где  $v$  — скорость перемещения проводников обмотки якоря в магнитном поле;  $e_t$  — трансформаторная э. д. с., индуцируемая в обмотке якоря переменным магнитным полем;  $e_v$  — э. д. с. вращения,

индуктируемая в проводниках обмотки якоря при перемещении их в магнитном поле.

Таким образом, пульсирующие магнитные потоки  $\Phi_{\text{я}}$  и  $\Phi_{\text{в}}$  индуктируют в обмотке якоря трансформаторные э. д. с., действующие значения которых

$$E_{\text{тв}} = 4,44 k_{\text{об}} f \omega \Phi_{\text{макс в}}; \quad E_{\text{тj}} = 4,44 k_{\text{об}} f \omega \Phi_{\text{макс я}},$$

где  $k_{\text{об}} = 2/\pi$  — обмоточный коэффициент при синусоидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре;  $f$  — частота тока;  $\omega$  — число последовательно соединенных витков в одной параллельной ветви обмотки якоря;  $\Phi_{\text{макс в}}$  и  $\Phi_{\text{макс я}}$  — амплитуды магнитных потоков  $\Phi_{\text{в}}$  и  $\Phi_{\text{я}}$ .

Трансформаторные э. д. с. отстают по фазе на  $\pi/2$  от создающих их магнитных потоков. Э. д. с. вращения пропорциональна магнитному потоку и при его изменении во времени изменяется в фазе с ним, так, что мгновенное значение э. д. с. вращения  $e_v = [pN/(60a)] n \Phi = [pN/(60a)] n \Phi_{\text{макс}} \sin \omega t$ . Так как  $N/a = 4N/(2 \cdot 2a) = \omega$  — число последовательно соединенных витков в одной параллельной ветви обмотки якоря, а  $pn/60 = f_{\text{в}}$  — частота вращения, не зависящая от частоты изменения магнитного потока, то максимальное значение э. д. с. вращения  $E_{v \text{ макс}} = 4 \omega f_{\text{в}} \Phi_{\text{макс}}$ . Таким образом, в проводниках обмотки вращающегося якоря магнитными потоками  $\Phi_{\text{в}}$  и  $\Phi_{\text{я}}$  индуктируются э. д. с. вращения, действующие значения которых  $E_{v \text{ в}} = 2\sqrt{2} \omega f_{\text{в}} \Phi_{\text{макс в}}; E_{v \text{ я}} = 2\sqrt{2} \omega f_{\text{в}} \Phi_{\text{макс я}}$ . Полагая, что компенсационная обмотка полностью уничтожает поток реакции якоря  $\Phi_{\text{я}}$ , получим  $\Phi_{\text{я}} = 0$ , следовательно,  $E_{\text{тj}} = 0$  и  $E_{v \text{ я}} = 0$ .

Если щетки установлены на геометрической нейтрали, то трансформаторная э. д. с. от магнитного потока обмотки возбуждения на щетках равна нулю ( $E_{\text{тв}} = 0$ ), так как в каждой параллельной ветви обмотки в половине проводников эта э. д. с. имеет одно направление, а в другой половине проводников — противоположное.

При неподвижном якоре ( $n = 0$ ), э. д. с. вращения от потока обмотки возбуждения равна нулю ( $E_{v \text{ в}} = 0$ ), и уравнение равновесия э. д. с. запишется в следующем виде:

$$U = -E_{\text{в}} + jI x + Ir,$$

где  $U$  — напряжение сети;  $E_{\text{в}}$  — э. д. с. обмотки возбуждения, индуктируемая магнитным потоком  $\Phi_{\text{в}}$ ;  $x = x_{\text{в}} + x_{\text{я}} + x_{\text{ком}}$  — индуктивное сопротивление двигателя, обусловленное потоками рассеяния и складывающееся из индуктивных сопротивлений обмотки возбуждения ( $x_{\text{в}}$ ), якоря ( $x_{\text{я}}$ ) и компенсационной обмотки ( $x_{\text{ком}}$ );  $r = r_{\text{в}} + r_{\text{я}} + r_{\text{ком}}$  — активное сопротивление двигателя, равное сумме активных сопротивлений обмотки возбуждения ( $r_{\text{в}}$ ), якоря ( $r_{\text{я}}$ ) и компенсационной обмотки ( $r_{\text{ком}}$ ).

На векторной диаграмме, показанной на рис. 36.5, а, вектор магнитного потока  $\Phi_{\text{в}}$  изображен совпадающим с вектором тока  $I$ , э. д. с.  $E_{\text{в}}$  отстает от магнитного потока на  $\pi/2$ . При неподвижном якоре угол  $\varphi$  между векторами  $U$  и  $I$  велик, так что  $\cos \varphi$  мал. При вращении якоря в нем создается э. д. с. вращения  $E_{\text{в}}$ , направленная

встречное току (рис. 36.5, б), так что ток уменьшается, а  $\cos \varphi$  увеличивается. При вращающемся якоре уравнение равновесия э. д. с. для двигателя примет следующий вид:  $\dot{U} = -\dot{E}_B - \dot{E}_v + jI_x + Ir$ .

При увеличении частоты вращения увеличивается противо-э. д. с.  $E_v$ , что повышает  $\cos \varphi$ . Поэтому коллекторные двигатели обычно работают при больших скоростях. Также для увеличения коэффициента мощности число витков обмотки возбуждения делают малым, а воздушный зазор возможно меньшим.

Существенный недостаток коллекторных двигателей переменного тока — трудные условия коммутации тока. При к. з. секции обмотки щеткой в этой секции индуктируются следующие э. д. с.

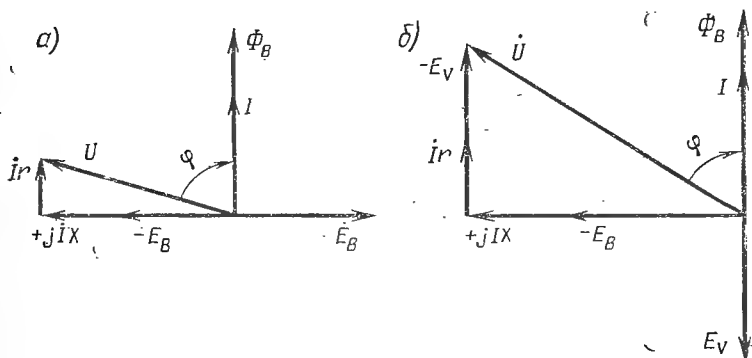


Рис. 36.5. Векторная диаграмма однофазного коллекторного двигателя при неподвижном (а) и вращающемся (б) якоре

1. Реактивная э. д. с.  $e_r$  (э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции). Так как секция может начать коммутировать в любой момент, т. е. при любом значении тока в якоре, то э. д. с.  $e_r$  зависит от значения тока в момент начала коммутации. Если коммутация начинается в момент, когда  $i=0$ , то  $e_r=0$ ; если же ток имеет максимальное значение в момент начала коммутации ( $I_{\max}$ ), то и реактивная э. д. с. максимальная. Таким образом, реактивная э. д. с. совпадает по фазе с током, что показано на векторной диаграмме, изображенной на рис. 36.6.

2. Трансформаторная э. д. с.  $e_t$ , индуктируемая в короткозамкнутой секции переменным магнитным полем обмотки возбуждения. Эта э. д. с. отстает от магнитного потока и от тока в якоре на  $\pi/2$  по фазе.

Под действием э. д. с.  $E_K = \sqrt{E_r^2 + E_t^2}$  в короткозамкнутой секции будет протекать добавочный ток к. з.  $I_K = E_K / Z_K$ , где  $Z_K$  — полное сопротивление короткозамкнутой секции. Этот ток создает неравномерное распределение тока под щеткой, перегружая один из краев ее, что ведет к образованию искрения под щетками и затрудняет работу машины. Для компенсации э. д. с.  $E_K$  можно уста-

новить дополнительные полюсы, обмотку которых включаем параллельно якору. В этом случае магнитный поток дополнительных полюсов  $\Phi_{\text{доп}}$  изобразится вектором, повернутым относительно вектора напряжения на  $\pi/2$  в сторону отставания.

При соответствующей полярности дополнительных полюсов э. д. с. вращения  $E_v$ , индуцируемая магнитным полем этих полюсов в обмотке якора, будет компенсировать э. д. с.  $E_k$ . Однако э. д. с. вращения  $E_v$  зависит от частоты вращения якора, тогда как э. д. с.  $E_k$  зависит от тока в якоре. Поэтому компенсация э. д. с. короткозамкнутой секции  $E_k$  возможна лишь при определенных нагрузках и частоте вращения. Компенсация реактивной э. д. с.  $E_r$

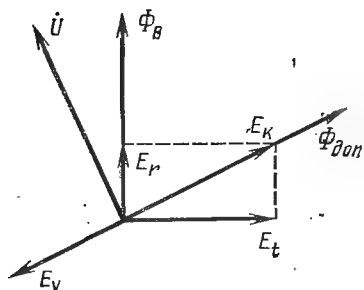


Рис. 36.6. Векторная диаграмма коммутлируемой секции

коммутлируемой секции возможна при любой нагрузке. Для этого необходимо на дополнительных полюсах поместить обмотку, включаемую последовательно с якром, как это делается в машинах постоянного тока. Скомпенсировать трансформаторную э. д. с.  $E_t$  с помощью дополнительных полюсов нельзя, так как любое изменение тока в якоре (нагрузки машины) и частоты вращения нарушает равновесие э. д. с.

Особенно тяжелые условия возникают при пуске двигателя. В начальный момент пуска двигателя ( $n=0$ ) и, следовательно, как реактивная э. д. с., так и э. д. с. вращения в коммутлируемой секции равны

нулю ( $E_r=0$  и  $E_v=0$ ), так что трансформаторная э. д. с.  $E_t$  ничем не компенсирована, что приводит к образованию интенсивного искрения под щетками. Для уменьшения трансформаторной э. д. с. коллекторные двигатели средних и больших мощностей выполняются с малым числом витков в секции и предназначаются для работы от сети с пониженной частотой тока (25 Гц и 16  $\frac{2}{3}$  Гц). Также для уменьшения трансформаторной э. д. с. при пуске двигателя используют уменьшение магнитного потока обмотки возбуждения, что ведет к увеличению пускового тока, т. е. также увеличивает искрение под щетками.

### § 36.3. Вращающий момент и характеристики однофазного коллекторного двигателя

Ток обмотки возбуждения, равный току в якоре, создает магнитный поток  $\Phi_v$ , который отстает по фазе от тока на угол  $\gamma$  за счет потерь в стали и влияния токов коммутлирующих секций;  $i = I_{\text{max}} \sin \omega t$  и  $\Phi_v = \Phi_{\text{maxv}} \sin (\omega t - \gamma)$ . Так как вращающий момент определяется произведением тока в якоре на магнитный поток, то

мгновенное значение вращающегося момента однофазного коллекторного двигателя

$$M = ki\Phi = \frac{pN}{2\pi a} I_{\max} \sin \omega t \Phi_{\max} b \sin(\omega t - \gamma) = \\ = \frac{pN}{4\pi a} I_{\max} \Phi_{\max} b [\cos \gamma - \cos(2\omega t - \gamma)],$$

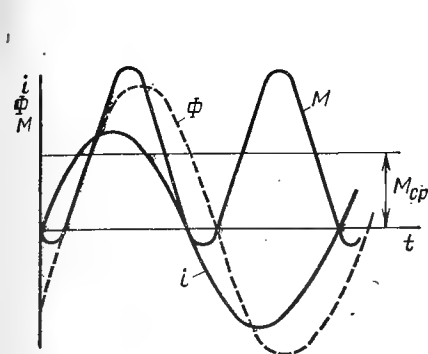


Рис. 36.7. Изменение во времени тока в якоре, магнитного потока и вращающегося момента однофазного коллекторного двигателя

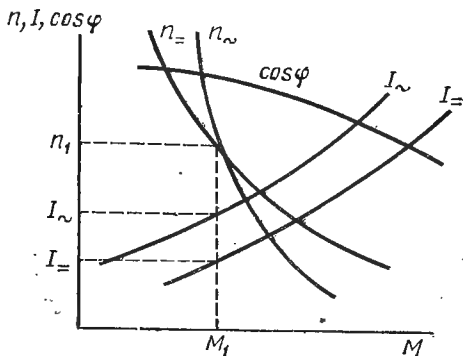


Рис. 36.8. Характеристики однофазного коллекторного двигателя

т. е. вращающий момент является суммой двух моментов, один из которых представляет собой постоянную величину:

$$M_{\text{ср}} = \frac{pN}{4\pi a} I_{\max} \Phi_{\max} b \cos \gamma,$$

а другой переменную, изменяющуюся во времени с двойной частотой:

$$M_{\text{пер}} = \frac{pN}{4\pi a} I_{\max} \Phi_{\max} b \cos(2\omega t - \gamma)$$

Таким образом, однофазный коллекторный двигатель развивает вращающий момент, изменяющийся во времени с двойной частотой (рис. 36.7). Вследствие инерции якорь не успевает изменять свою скорость, так что изменение вращающего момента во времени не сказывается на работе двигателя. Из выражения среднего момента  $M_{\text{ср}}$  видно, что для получения возможно больших моментов необходимо уменьшить угол  $\gamma$ , т. е. уменьшить потери в стали двигателя. Поэтому магнитную цепь машины собирают полностью из листовой стали. Однако даже в идеальном случае, когда  $\gamma = 0$ , работа двигателя от сети переменного тока менее экономична, чем работа этого же двигателя от сети постоянного тока. При работе



двигателя от сети переменного тока при  $\gamma=0$  среднее значение вращающего момента

$$M_{\text{ср}} = \frac{pN}{4\pi a} I_{\text{max}} \Phi_{\text{max}} b = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \frac{I \Phi_{\text{max}} b}{\sqrt{2}},$$

где  $I$  — действующее значение тока в якоре.

При работе двигателя от сети постоянного тока вращающий момент

$$M_{\text{пос}} = \frac{pN}{2\pi a} I_{\text{я}} \Phi_{\text{max}},$$

Таким образом, при одинаковых габаритах машины, т. е. при одинаковых амплитудах магнитных потоков и равенстве действующего значения переменного тока постоянному току в якоре ( $I=I_{\text{я}}$ ), при работе машины от сети переменного тока вращающий момент окажется в  $\sqrt{2}$  раз меньшим, чем при работе от сети постоянного тока. Для создания одного и того же вращающего момента  $M$  при работе на переменном токе действующее значение тока в якоре должно быть больше тока в якоре при работе на постоянном токе, т. е. как поперечное сечение проводов, так и габариты машины, предназначенной для работы от сети переменного тока, больше, чем машины постоянного тока.

На рис. 36.8 изображены характеристики коллекторного двигателя при работе его от сети переменного и постоянного тока. Характеристики показывают, что при работе от сети переменного тока двигатель потребляет больший ток  $I_{\sim}$ , чем при работе от сети постоянного тока  $I_{=}$ . Уменьшение  $\cos \varphi$  с увеличением нагрузки двигателя объясняется тем, что при уменьшении частоты вращения также уменьшается и э. д. с. вращения в обмотке якоря. Уменьшение частоты вращения  $n_{\sim}$  с увеличением нагрузки двигателя при работе на переменном токе происходит быстрее, чем при работе от сети постоянного тока  $n_{=}$ . Это объясняется уменьшением  $\cos \varphi$  с ростом нагрузки.

## Глава 37

### ТРЕХФАЗНЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

#### § 37.1. Принцип введения добавочной э. д. с. во вторичный контур асинхронного двигателя

Частоту вращения и  $\cos \varphi$  асинхронного двигателя можно регулировать введением в цепь ротора асинхронного двигателя добавочной э. д. с.  $E_{\text{доб}}$ , которая должна иметь ту же частоту скольжения  $f_2 = S f_1$ , что и э. д. с. ротора  $E_{2\text{с}}$ , так как только при этом условии между ними может устанавливаться взаимодействие. Добавление в цепь ротора э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  означает подведение к ротору дополнительной активной мощности  $P_{\text{доб}} = m_2 E_{\text{доб}} I_2 \cos \varphi_{\text{доб}}$ , которая в зависимости от сдвига фаз  $\varphi_{\text{доб}}$  между э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  и то-

ком  $I_2$  может иметь различный знак. При  $P_{\text{доб}} > 0$  эта мощность передается ротору извне, при  $P_{\text{доб}} < 0$  она отдается ротором во внешнюю цепь, при  $P_{\text{доб}} = 0$  ( $\varphi_{\text{доб}} = \pi/2$ ) в цепь ротора вводится чисто реактивная мощность.

При неизменном напряжении питающей сети  $U_1$ , пренебрегая падением напряжения в сопротивлении обмотки статора, можем считать как э. д. с. статора  $E_1$ , так и магнитный поток  $\Phi$  постоянными, независимо от режима работы двигателя. Так как при работе двигателя скольжение очень мало и, следовательно, частота тока в роторе  $f_2 = S f_1$  мала, то индуктивным сопротивлением обмотки ротора можно пренебречь. В этом случае ток ротора  $I_2 = S E_2 / r_2$ , где  $S$  — скольжение;  $E_2$  — э. д. с. в фазе обмотки неподвижного ротора,  $r_2$  — активное сопротивление фазы ротора. Вращающий момент двигателя

$$M = \frac{m_2}{\Omega_1} E_2 I_2 = \frac{m_2}{\Omega_1} \cdot \frac{E_2^2 S}{r_2},$$

где  $m_2$  — число фаз ротора,  $\Omega_1$  — угловая частота вращения поля.

Если в цепь ротора ввести добавочную э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  частоты скольжения в фазе или противофазе с э. д. с.  $E_2$ , то ток в фазе ротора  $I_2 = (S E_2 \pm E_{\text{доб}}) / r_2$  (знак плюс при согласном направлении э. д. с., минус — при встречном) и вращающий момент

$$M = \frac{m_2}{\Omega_1} \cdot \frac{E_2^2 S \pm E_2 E_{\text{доб}}}{r_2}.$$

Если тормозной момент на валу двигателя не изменен, то добавление э. д. с. в роторе вызывает нарушение равновесия моментов, что повлечет за собой изменение скольжения и частоты вращения ротора. При изменении скольжения меняется также как э. д. с., так и ток в роторе, так что процесс изменения скорости будет протекать до восстановления равновесия моментов, т. е. до тех пор, пока ток в роторе не примет своего начального значения (при неизменном тормозном моменте).

Пусть до введения э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  скольжение было  $S_1$ , а после введения э. д. с. стало равным  $S_2$ . Тогда можно записать следующее равенство:  $E_2^2 S_1' / r_2 = (E_2^2 S_2 \pm E_2 E_{\text{доб}}) / r_2$ , откуда  $S_2 = S_1 \pm E_{\text{доб}} / E_2$ , причем знак минус соответствует совпадению по фазе э. д. с.  $E_2$  и  $E_{\text{доб}}$ , а знак плюс — сдвигу их на  $180^\circ$ .

Таким образом введение в цепь ротора добавочной э. д. с.  $+E_{\text{доб}}$  в фазе с э. д. с.  $S E_2$  увеличивает вращающий момент двигателя, что вызывает увеличение частоты вращения и уменьшает скольжение. При этом к ротору извне подводится добавочная активная мощность  $P_{\text{доб}} = m_2 E_{\text{доб}} I_2$ . При  $E_{\text{доб}} = S_1 E_2$  скольжение  $S_2 = 0$ , при  $E_{\text{доб}} > S_1 E_2$  скольжение  $S_2 < 0$  и ротор вращается с частотой, большей частоты поля.

При введении в цепь ротора э. д. с.  $-E_{\text{доб}}$  в противофазе с э. д. с.  $S E_2$  скольжение возрастает, частота вращения ротора уменьшается. В этом случае активная мощность  $P_{\text{доб}} = -m_2 E_{\text{доб}} I_2$  ротором

отдается в сеть. Векторные диаграммы э. д. с. и токов в одной фазе ротора при введении добавочной э. д. с. показаны на рис. 37.1.

Если в цепь ротора добавляется э. д. с.  $E_{доб}$ , сдвинутая относительно э. д. с.  $S_1 E_2$  по фазе на  $\pi/2$ , то возникает дополнительный ток  $I_{доб}$ , также сдвинутый по фазе относительно э. д. с.  $S_1 E_2$  на  $\pi/2$

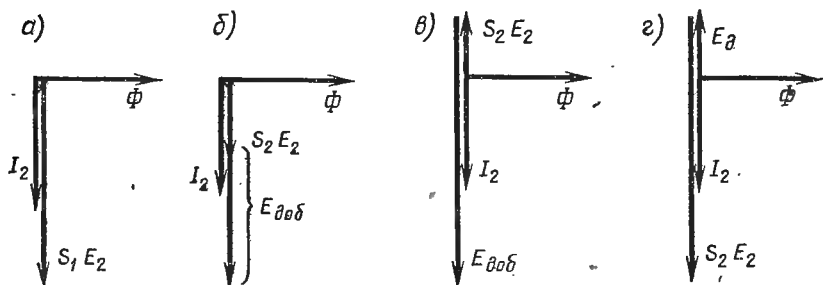


Рис. 37.1. Векторные диаграммы для фазы ротора при введении дополнительной э. д. с.:

а —  $E_{доб} = 0$ ;  $S_1 > 0$ ; б —  $E_{доб} < S_1 E_2$ ,  $S_2 < S_1$ ; в —  $E_{доб} > S_1 E_2$ ,  $S_2 < 0$ ; г —  $E_{доб} < 0$ ,  $S_2 > S_1 > 0$

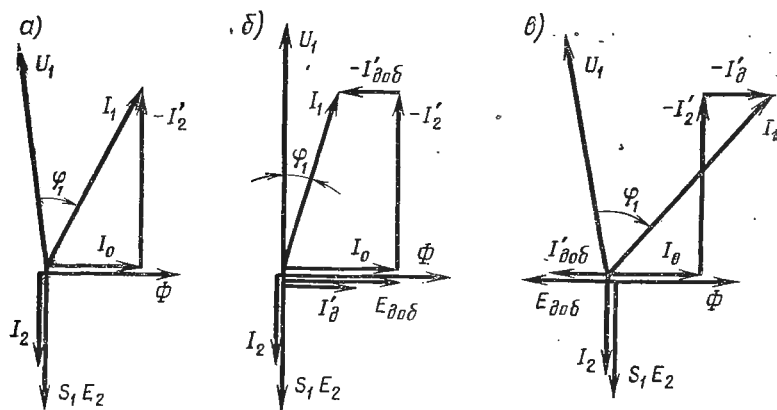


Рис. 37.2. Векторные диаграммы для фазы двигателя при введении в цепь ротора дополнительной э. д. с., сдвинутой относительно э. д. с.  $S_1 E_2$  на  $\pi/2$ :

а —  $E_{доб} = 0$ ;  $S_1 > 0$ ; б —  $E_{доб}$  опережает  $S_1 E_2$ ; в —  $E_{доб}$  отстает от  $S_1 E_2$  на  $\pi/2$

(рис. 37.2) и поэтому не создающий никакого вращающего момента. Следовательно, скольжение  $S_1$  остается при этом неизменным, но изменяется ток статора, который будет содержать дополнительную составляющую  $I'_{доб}$  приведенного тока ротора. Как видно из рис. 37.2, введение в цепь ротора добавочной э. д. с., сдвинутой относительно э. д. с.  $S_1 E_2$  на  $\pi/2$ , позволяет регулировать коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  двигателя при неизменной частоте вращения

ротора. В случае, когда добавочная э. д. с.  $E_{доб}$  опережает э. д. с.  $S_1 E_2$ , фазный угол  $\varphi_1$  уменьшается и  $\cos \varphi_1$  возрастает. При отставании э. д. с.  $E_{доб}$  от  $S_1 E_2$   $\cos \varphi_1$  понижается.

Необходимые для возбуждения вращающегося магнитного поля со стороны статора и ротора реактивные мощности

$$P_{p1} = m_1 I_0 E_1 \text{ и } P_{p2} = m_1 I_0 E_2',$$

где  $E_2' = E_1$  — приведенная к обмотке статора э. д. с. фазы обмотки ротора. При  $S < 1$ ;  $P_{p2} < P_{p1}$ , т. е. при  $S < 1$ , магнитное поле выгоднее создавать со стороны ротора, так как при этом требуется меньшая реактивная мощность. Поэтому в коллекторных машинах чаще возбуждение вращающегося поля осуществляется токами обмотки ротора.

В случае, когда добавочная э. д. с.  $E_{доб}$  сдвинута относительно э. д. с.  $S E_2$  на угол  $\alpha \pm \pi/2$ , происходит одновременное регулирование частоты вращения ротора (скольжения  $S$ ) и коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$ . Э. д. с.  $E_{доб}$  следует разложить на две составляющие  $E'_{доб}$  и  $E''_{доб}$  (рис. 37.3), одна из которых  $E'_{доб}$  при неизменном тормозном моменте изменит скольжение ( $S_2 < S_1$ ), а вторая составляющая  $E''_{доб}$  вызовет изменение угла сдвига фаз  $\varphi_1$  между  $U_1$  и  $I_1$ .

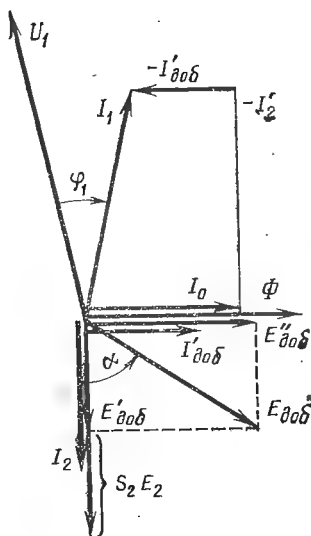


Рис. 37.3. Векторная диаграмма для фазы двигателя при введении добавочной э. д. с., сдвинутой относительно э. д. с.  $S_1 E_2$  на угол  $\alpha \neq \pm \pi/2$

## § 37.2. Коллектор как преобразователь частоты и фазы

Введение в цепь ротора добавочной э. д. с. дает возможность экономично (без дополнительных потерь) регулировать частоту вращения ротора и коэффициент мощности двигателя. Так как частота добавочной э. д. с. должна быть всегда равной частоте скольжения  $f_2 = S f_1$ , то возникает необходимость в преобразователе частоты, в качестве которого используется коллектор. Для этого обмотка ротора выполняется аналогично обмоткам машин постоянного тока двухслойной (обычно с диаметральным шагом) и выводится на коллектор (рис. 37.4). Каждой паре полюсов в трехфазной машине соответствуют три комплекта щеток ( $a, b, c$ ), помещенных на коллекторе под углом 120 эл. град. Если такой ротор помещен во вращающееся магнитное поле, угловая частота которого  $\Omega_1 = 2\pi n_1/60$ , а частота вращения ротора  $\Omega_2 = 2\pi n_2/60$ , то в каждом витке ротора будет индуцирована э. д. с. частоты скольжения  $f_2 = S f_1$ . В обмотке статора вращающееся магнитное поле индуцирует э. д. с. частоты  $f_1$ . Так как между любой парой щеток,

например  $a-b$ , всегда включено одно и то же число витков, определенным образом ориентированных в пространстве, то вращающееся магнитное поле пересекает виток, соединенный со щеткой  $b$ , одновременно с первым витком фазы статора, а последний виток этой фазы — одновременно с витком обмотки ротора, соединенным с щеткой  $a$ , независимо от того, вращается ротор или нет. Следовательно, э. д. с. на щетках  $a-b$  и в обмотке статора  $A-B$  совпадают по фазе и меняются во времени с одной и той же частотой, определяемой частотой вращения поля  $\Omega_1$ . Таким образом, частота

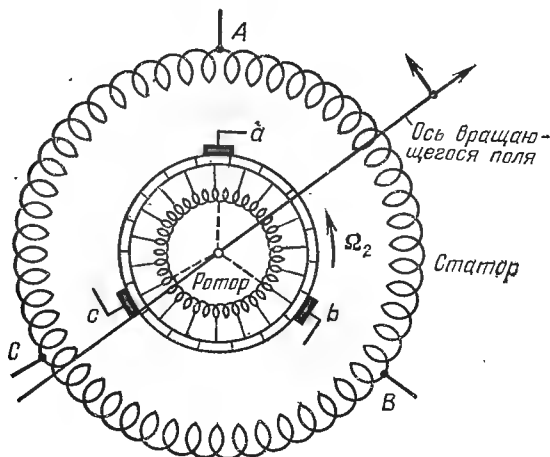


Рис. 37.4. Принцип действия трехфазной коллекторной машины

э. д. с. на щетках не зависит от частоты вращения ротора, от которой зависит лишь амплитуда этой э. д. с. При синхронной частоте ротора  $\Omega_2 = \Omega_1$  проводники обмотки ротора не пересекаются вращающимся магнитным полем и э. д. с. на щетках равна нулю. При частоте вращения ротора большей частоты поля  $S < 0$  и э. д. с. на щетках изменяет фазу на  $180^\circ$ .

Аналогично можно установить, что при подключении щеток  $a, b, c$  к трехфазной сети источника с частотой тока  $f_1$  в обмотке вращающегося ротора будет протекать ток и индуцироваться э. д. с. с частотой скольжения. Если щетки на коллекторе сдвинуть на некоторый угол  $\alpha$  против направления вращения поля, то проводники обмотки ротора будут пересекаться линиями вращающегося поля раньше соответствующих проводников обмотки статора. Следовательно, э. д. с. обмотки ротора и на щетках коллектора будут опережать по фазе э. д. с. соответствующей фазы статора. При сдвиге щеток в обратном направлении э. д. с. ротора и на щетках будут отставать от фазной э. д. с. статора. Таким образом, поворот щеток на коллекторе вызывает изменение фазы э. д. с. ротора, что приводит к изменению фазового сдвига  $\varphi$ .

В коллекторных машинах переменного тока коллектор дает возможность соединять обмотку вращающегося ротора, в витках которой индуктированы э. д. с. частоты скольжения  $f_2$ , с внешней неподвижной цепью, частота э. д. с. которой  $f_1$ , и вводить в цепь ротора добавочную э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  для регулирования частоты вращения ротора и  $\cos \varphi$ , т. е. коллектор является преобразователем частоты и фазы.

### § 37.3. Трехфазные коллекторные двигатели параллельного возбуждения

В трехфазных коллекторных машинах цепь ротора для введения в нее добавочной э. д. с. включается параллельно с цепью статора. Среди различных типов коллекторных двигателей параллельного возбуждения особенно широкое распространение получил двигатель с питанием со стороны ротора. Как было показано выше, для возбуждения вращающегося магнитного поля при питании двигателя со стороны ротора требуется меньшая реактивная мощность, чем при питании его со стороны статора. Схема коллекторного двигателя параллельного возбуждения с первичной обмоткой, расположенной на роторе, изображена на рис. 37.5. На роторе двигателя расположена первичная обмотка 1, которая через контактные кольца включается в трехфазную сеть переменного тока. В верхней части тех же пазов ротора размещается вспомогательная обмотка 2, соединенная с коллектором. Каждая фаза вторичной обмотки 3, располагаемой на статоре, соединяется с двумя системами щеток, установленных на коллекторе. С помощью вспомогательной коллекторной обмотки 2 в обмотку статора 3, являющуюся вторичной цепью двигателя, вводится добавочная э. д. с.  $E_{\text{доб}}$ . При совмещении щеток  $a$  и  $b$  с осями фаз статора I, II, III добавочная э. д. с. равна нулю ( $E_{\text{доб}}=0$ ) и двигатель работает как обычный короткозамкнутый асинхронный с питанием его со стороны ротора. Если щетки каждой фазы симметрично раздвигать в обе стороны от осей I, II, III, то во вторичной цепи будет индуктирована добавочная э. д. с.  $E_{\text{доб}}$ , находящаяся в фазе или противофазе с э. д. с.  $SE_{\text{доб}}$ . Значение э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  определяется углом раздвижения щеток.

При сдвиге щетки  $a$  влево от оси I, а щетки  $b$  — вправо (рис. 37.6, а), э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  и  $SE_2$  в контуре вторичной обмотки направлены встречно, что вызовет уменьшение частоты вращения ротора. Если щетку  $b$  сдвинуть влево от оси I, а щетку  $a$  — вправо (рис. 37.6, б), то э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  и  $SE_2$  окажутся в фазе, что вызовет увеличение частоты. При частоте вращения ротора, большей частоты вращения поля ( $n_2 > n_1$ ), т. е. при отрицательном скольжении, э. д. с.  $SE_2$  изменит свое направление и будет действовать встречно э. д. с.  $E_{\text{доб}}$ . Если щетки  $a$  и  $b$  сдвинуты несимметрично относительно оси обмотки статора 1 (рис. 37.6, в), то э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  опережает э. д. с.  $SE_2$ , что повышает  $\cos \varphi$  двигателя. Наоборот, при перемещении щетки  $a$  на больший угол относительно оси I, чем щетку  $b$ ,

э. д. с.  $E_{\text{доб}}$  будет отставать от э. д. с.  $SE_2$  и  $\cos \varphi$  двигателя понизится.

При любом положении щеток коллекторный двигатель параллельного возбуждения, так же как и обычный асинхронный двига-

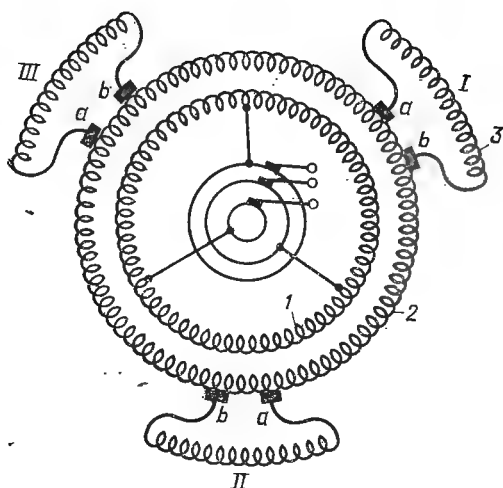


Рис. 37.5. Схема трехфазного коллекторного двигателя параллельного возбуждения с питанием со стороны ротора

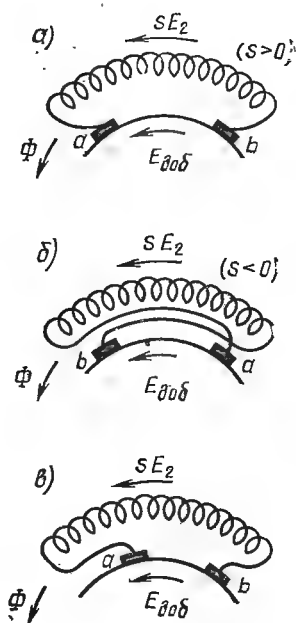


Рис. 37.6. Регулирование частоты вращения и  $\cos \varphi$  коллекторного двигателя:

$a$  — понижение частоты  $S > 0$ ;  
 $b$  — повышение частоты  $S < 0$ ;  
 $\alpha$  — повышение  $\cos \varphi$

тель, имеет жесткую скоростную характеристику. При пуске двигателя щетки  $a$  и  $b$  раздвигают на угол, примерно равный  $180^\circ$ , так что добавочная э. д. с.  $E_{\text{доб}}$ , направленная встречно э. д. с.  $SE_2$ , ограничивает пусковой ток при значительном пусковом моменте.

#### § 37.4. Компенсированные и синхронизированные асинхронные двигатели и фазокомпенсаторы

При введении в цепь ротора добавочной э. д. с.  $E_{\text{доб}}$ , сдвинутой по фазе относительно э. д. с.  $SE_2$  на угол  $\pm \pi/2$ , можно регулировать  $\cos \varphi$  двигателя без изменения его частоты. Поэтому описанный выше коллекторный двигатель, работающий с частотой, мало отличающейся от синхронной, можно рассматривать как асинхронный компенсированный двигатель. Практически компенсированные двигатели

ли работают в режиме, когда добавочная э. д. с.  $E_{доб}$  опережает э. д. с.  $SE_2$ , так как при этом  $\cos \varphi$  повышается.

Схема компенсированного двигателя, питаемого со стороны ротора, отличается от принципиальной схемы трехфазной коллекторной машины, изображенной на рис. 37.4, лишь тем, что обмотку статора соединяют звездой и подключают к щеткам  $a, b, c$ . Щетки на коллекторе устанавливают так, чтобы э. д. с.  $E_{доб}$  опережала э. д. с.  $SE_2$ , индуктированную в обмотке статора, на  $90^\circ$  эл. град.

Если в обмотку ротора обычного асинхронного двигателя ввести постоянный ток, то практически мы получим синхронный двигатель, который может работать с опережающим  $\cos \varphi$ . Основное отличие такого двигателя от нормального синхронного заключается в том, что такой синхронизированный асинхронный двигатель, выпав из синхронизма, продолжает работать как асинхронный и при благоприятных условиях снова входит в синхронизм.

В синхронизированных двигателях большой мощности источником постоянного тока, так же как в синхронных двигателях, может быть возбудитель, т. е. машина постоянного тока, находящаяся на одном валу с главным двигателем и питающая обмотку ротора этого двигателя постоянным током через контактные кольца. В двигателях малой мощности такой возбудитель становится неэкономичным. Конструкция синхронизированного двигателя, при которой машину постоянного тока встраивают в асинхронный двигатель, придавая ей форму отдельной обмотки с коллектором и располагая на роторе, где помещается первичная обмотка, на практике применения не нашла.

Коллекторную машину, предназначенную для введения в цепь ротора асинхронного двигателя э. д. с.  $E_{доб}$ , опережающей э. д. с. вторичной обмотки  $SE_2$  на угол  $\pi/2$ , называют фазокомпенсатором.

Различают фазокомпенсаторы двух типов: с собственным и независимым возбуждением. В первом случае фазокомпенсатор возбуждается от цепи ротора главного двигателя, во втором — от сети, питающей всю установку. При этом фазокомпенсаторы с собственным и независимым возбуждением применяются для компенсации  $\cos \varphi$  двигателей большой мощности при пониженной частоте вращения.

Фазокомпенсаторы с собственным возбуждением помещают на роторе основного асинхронного двигателя и приводят во вращение вспомогательными двигателями. Обмотку ротора основного двигателя через контактные кольца соединяют со щетками коллектора фазокомпенсатора, который вводит в цепь ротора основного двигателя добавочную э. д. с., опережающую э. д. с. ротора  $SE_2$ .

В фазокомпенсаторах с независимым возбуждением добавочная э. д. с. в цепь ротора вводится через преобразователь частоты, находящийся на одном валу с основным двигателем. Такой преобразователь меняет частоту при неизменном напряжении на щетках, т. е. добавочная э. д. с. вводится в цепь ротора двигателя независимо от режима его работы.



### § 38.1. Основные сведения

Для преобразования электрической энергии одного вида в другой наряду со статическими устройствами применяют электромашинные преобразователи. В качестве электромашинных преобразователей служат агрегаты, состоящие из двух машин — двигатель-генератор и одномашинные (одноякорные) преобразователи. Одноякорный преобразователь состоит из якоря, имеющего только одну обмотку. В этом случае преобразование электрической энергии происходит без промежуточного ее преобразования в механическую.

Двигатель-генератор состоит из двух машин, соединенных механически, но электрически не связанных между собой. Такой агрегат позволяет преобразовать род тока, его напряжение, частоту, число фаз. Если агрегат состоит из машин переменного и постоянного тока, то при работе первой в качестве двигателя, а второй в качестве генератора можно преобразовывать переменный ток в постоянный. При обратном использовании машин можно преобразовывать постоянный ток в переменный. Если агрегат состоит из двух машин переменного тока, то можно преобразовывать частоту, напряжение и число фаз переменного тока. Двигатель-генератор чаще всего используют для преобразования переменного тока в постоянный. Достоинство агрегата — возможность применения нормальных электрических машин и плавного регулирования преобразованного напряжения в широких пределах вследствие отсутствия электрической и магнитной связи между обеими машинами. Наряду с этим двигатель-генератор обладает и существенными недостатками: низкий к. п. д., равный произведению к. п. д. обеих машин; большие размеры и относительно высокая стоимость.

Для целого ряда электротехнологических установок, высокоскоростного привода, различных схем автоматики, схем возбуждения синхронных машин большой мощности и другого необходим источник переменного тока повышенной частоты (сотни и десятки тысяч герц). В качестве такого источника используют преобразователи частоты. Они состоят из асинхронного или синхронного двигателя (в передвижных электростанциях применяется двигатель внутреннего сгорания) и синхронного генератора повышенной частоты нормальной или специальной конструкции.

Так как частота  $f = pn/60$ , то для ее повышения необходимо увеличивать либо частоту вращения  $n$ , либо число полюсов  $2p$ . Предел увеличения частоты вращения определяется допустимыми механическими напряжениями узлов ротора, и для существующих материалов линейная скорость не должна превышать 150 м/с. Увеличение числа полюсов вызывает либо увеличение диаметра, что ограничивается допустимой частотой ротора, либо уменьшение полюсного деления. При очень малых полюсных делениях укладка обмотки

возбуждения весьма затруднена. Синхронные генераторы нормальной конструкции выпускают на частоту до 400 Гц. Для частот выше 400 Гц нормальная конструкция становится неприемлемой, и здесь находят применение генераторы с постоянными магнитами и генераторы индукторного типа, не имеющие обмотки на роторе.

### § 38.2. Одноякорный преобразователь

**Устройство и принцип действия.** Одноякорный преобразователь (рис. 38.1) представляет собой конструктивное объединение машины постоянного тока и синхронной и отличается от машины посто-

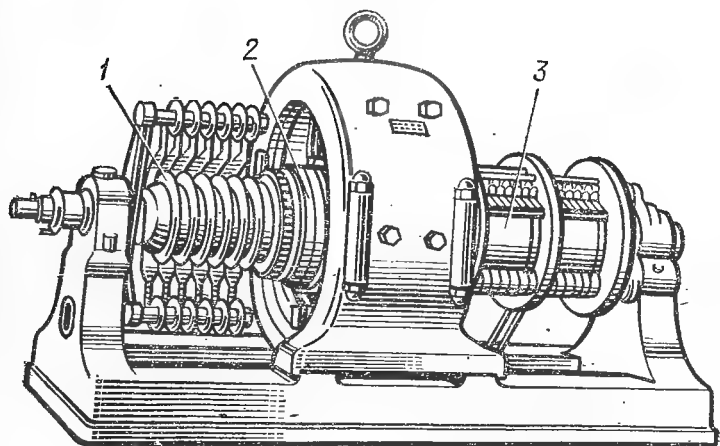


Рис. 38.1. Одноякорный преобразователь

янного тока наличием контактных колец 1, насаженных на вал якоря 2 со стороны, противоположной коллектору 3.

На рис. 38.2 показана схема двухполюсного трехфазного преобразователя, у которого напряжение на щетках  $+$  и  $-$  равно напряжению постоянного тока  $U_d$ , а напряжение на контактных кольцах  $k$  равно напряжению переменного тока  $U$ . Число контактных колец  $m'$  в многофазных системах равно числу фаз  $m$ ; для однофазной системы  $m=1$ , а  $m'=2$ . Число пар параллельных ветвей обмотки  $a$ , и к каждому кольцу присоединяют  $a$  равнопотенциальных точек, т. е. кольца являются своего рода уравнительными соединениями первого рода для обмотки постоянного тока, которая обычно выполняется петлевой, и только для небольших мощностей ее выполняют волновой. Обмотки якоря присоединяют к контактным кольцам и к коллектору. Для улучшения коммутации одноякорные преобразователи снабжены дополнительными полюсами.

Если при возбужденных полюсах привести во вращение посторонним двигателем якорь преобразователя, то в обмотке якоря бу-

дет наводиться переменная э. д. с., которую можно снять с контактных колец, а на щетках, расположенных на коллекторе, — постоянная э. д. с., как в машинах постоянного тока. Такую машину называют *генератором двойного тока*.

Если к контактным кольцам подвести переменный ток, то машина со стороны переменного тока будет работать двигателем, а со стороны постоянного тока — генератором. В этом случае будет происходить процесс преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока в одном якоре.

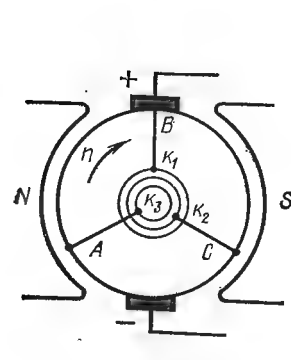


Рис. 38.2. Принципиальная схема двухполюсного трехфазного одноякорного преобразователя

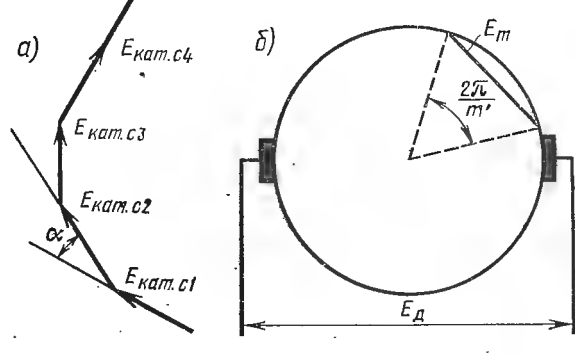


Рис. 38.3. Определение фазной э. д. с:

а — расположение векторов э. д. с. катушечных сторон;  
б — образование замкнутого многоугольника из векторов э. д. с. катушечных сторон в пределе, переходящего в окружность

Если к щеткам одноякорного преобразователя подвести постоянный ток, тогда машина со стороны коллектора будет работать двигателем, а со стороны колец — генератором переменного тока.

Пуск преобразователя возможен со стороны постоянного и переменного тока. При пуске со стороны постоянного тока (при наличии источника питания) якорь преобразователя разгоняется до синхронной частоты и включается в сеть переменного тока, предварительно отключив питание со стороны постоянного тока.

Пуск со стороны переменного тока производится одним из известных способов; чаще всего применяется асинхронный пуск синхронного двигателя.

**Соотношение э. д. с. и напряжений.** Соотношение между постоянной э. д. с.  $E_d$  и переменной  $E$  найдем следующим образом. Если  $E_{кат.с1}$  (рис. 38.3, а) — э. д. с. катушечной стороны, расположенной в первом пазу, то э. д. с.  $E_{кат.с2}$  катушечной стороны, расположенной во втором пазу, смещена на угол  $\alpha$ , и т. д. Все векторы катушечных сторон, принадлежащих одной паре параллельных ветвей, образуют замкнутый многоугольник, который в пределе переходит в окружность (рис. 38.3, б). Диаметр этой окружности  $E_d$  равен э. д. с. одной параллельной ветви постоянного тока, а хорда  $E_m$

равна амплитуде э. д. с. переменного тока при  $m'$  контактных кольцах. Очевидно, что

$$E_m = 2 \cdot 0,5 E_d \sin [2\pi / (2m')] \quad (38.1)$$

и действующее значение  $E = E_m / \sqrt{2}$ , откуда

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_d \sin \frac{\pi}{m'}; \quad (38.2)$$

для трехфазной системы  $m' = m = 3$  и

$$E_3 = \sqrt{3} E_d / (2 \sqrt{2}) = 0,613 E_d; \quad (38.3)$$

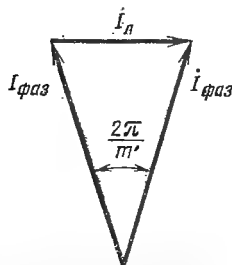


Рис. 38.4. Векторная диаграмма фазных и линейных токов

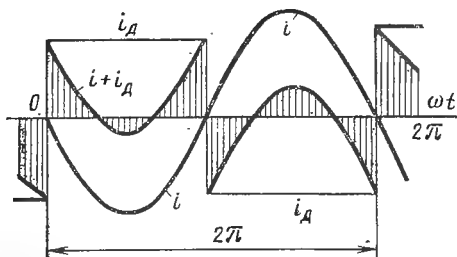


Рис. 38.5. Кривые изменения токов  $i_{\text{л}}$ ,  $i$  на протяжении периода

для однофазной системы  $m' = 2$  и

$$E_1 = E_d / \sqrt{2} = 0,707 E_d. \quad (38.4)$$

Данные соотношения получены для синусоидального распределения магнитного поля машины. Как будет показано далее, реакция якоря одноякорного преобразователя мала, и напряжение мало отличается от э. д. с. Поэтому при преобразовании переменного тока в постоянный

$$U / U_d \approx 1,02 E_d / E; \quad (38.5)$$

при преобразовании постоянного в переменный

$$U_d / U \approx 1,02 E_d / E. \quad (38.6)$$

**Соотношение токов.** При преобразовании переменного тока в постоянный можно написать равенство

$$m U I_{\text{фаз}} \eta \cos \varphi = U_d I_d, \quad (38.7)$$

где  $\varphi$  — угол между напряжением  $U$  и фазным током  $I_{\text{фаз}}$ ;  $\eta$  — к. п. д. преобразователя, откуда

$$I_{\text{фаз}} = U_d I_d / (m' U \eta \cos \varphi). \quad (38.8)$$

Так как обмотка якоря всегда соединена многоугольником и непосредственно измерить легко только линейный ток  $I_{\text{л}}$ , то, воспользовавшись полученным из рис. 38.4 соотношением  $I_{\text{л}} =$

$= 2I_{\text{фаз}} \sin(\pi/m')$ , а также приняв  $U_{\text{д}}/U = E_{\text{д}}/E = \sqrt{2}[\sin(\pi/m)]$ , получим после подстановки в выражение для  $I_{\text{ф}}$

$$I_{\text{д}} = I_{\text{д}} 2\sqrt{2} / (m'\eta \cos \varphi). \quad (38.9)$$

На рис. 38.5 представлены кривые изменения на протяжении периода постоянного и переменного токов  $i_{\text{д}}$  и  $i$ , протекающих в проводах обмотки якоря. Ток  $i_{\text{д}} = I_{\text{д}}/(2a)$ , где  $2a$  — число параллельных ветвей обмотки постоянного тока. Кривые построены при следующих допущениях: щетки установлены на геометрической

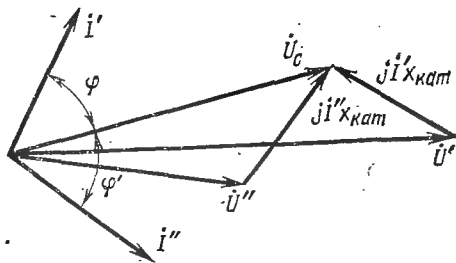


Рис. 38.6. Векторная диаграмма при регулировании напряжения  $U$ -одноякорного преобразователя

нейтрали; период коммутации постоянного тока равен нулю, поэтому изменение тока от  $+i_{\text{д}}$  до  $-i_{\text{д}}$  происходит мгновенно; падением напряжения пренебрегаем, поэтому напряжения равны индуцированным э. д. с.; ток  $i$  считаем активным, тогда токи  $i$  и  $i_{\text{д}}$  будут иметь разные знаки (преобразованный ток является током генераторного режима и протекает под воздействием индуцированной э. д. с.; преобразуемый ток является током двигательного режима и протекает под воздействием напряжения сети, которое при принятых допущениях находится в противофазе с индуцированной э. д. с.). Если учесть факторы, которыми раньше пренебрегли, то кривая  $i$  сместится относительно кривой  $i_{\text{д}}$  и токи  $i$  и  $i_{\text{д}}$  пройдут через нуль в разные моменты времени. Мгновенный ток в витке

$$i_{\text{д}} + i = \frac{I_{\text{д}}}{2a} - \frac{\sqrt{2} I_{\text{фаз}}}{a} \sin(\omega t - \alpha - \Psi), \quad (38.10)$$

где  $\alpha$  — угол, определяющий положение витка относительно середины фазы ( $-\pi/m' < \alpha < \pi/m'$ ),  $\Psi$  — сдвиг фаз между  $E$  и  $I_{\text{фаз}}$ . Кривые рис. 38.5 построены в предположении, что  $\alpha = 0$  и  $\Psi = 0$ . Кривая результирующего тока показывает, что ток и потери в обмотке якоря и реакция якоря в преобразователе меньше, чем при работе той же машины в режиме двигателя или генератора, когда в обмотке якоря протекает только один из токов  $i$  или  $i_{\text{д}}$ . Из сказанного ясно, что к. п. д. одноякорного преобразователя больше, чем к. п. д. генератора или двигателя при тех же токах  $I$  и  $I_{\text{д}}$ , но коллектор должен быть рассчитан на ток  $I_{\text{д}}$ .

**Регулирование напряжений.** Так как соотношение между постоянной и переменной э. д. с. одноякорного преобразователя является величиной постоянной, то регулирование преобразованного напряжения изменением тока возбуждения при постоянной величине

преобразуемого напряжения невозможно. Допустим, что постоянный ток преобразуется в переменный, тогда для имеющегося двигателя параллельного возбуждения индуктированная э. д. с.  $E = cn\Phi$ . При изменении тока возбуждения  $I_b$  частота вращения  $n$  и магнитный поток  $\Phi$  меняются так, что их произведение остается постоянным, поэтому останется практически постоянной э. д. с.  $E_d$ , а вместе с тем и э. д. с.  $E$ . Если преобразуется переменный ток в постоянный, то изменение  $I_b$  вызывает изменение реактивного тока (см. U-образные кривые, рис. 31.11), который оказывает размагничивающее или намагничивающее действие, сохраняя результирующий поток  $\Phi$  практически неизменным при заданном  $U$ . Картина коренным образом изменится, если между сетью и контактными кольцами преобразователя включить катушку индуктивности, сопротивление которой  $Z_{кат} \approx X_{кат}$ . Если фазное напряжение сети  $U_c$ , а фазное напряжение на контактных кольцах  $\tilde{U}$ , то  $\tilde{U}_c = \tilde{U} + jI X_{кат}$  (рис. 38.6). Изменяя величину тока возбуждения  $I_b$ , изменяем фазу тока  $I$ , например, от  $\varphi'$  для тока  $I'$  до  $\varphi''$  для тока  $I''$  и вместе с тем падение напряжения на катушке от  $jI' X_{кат}$  до  $jI'' X_{кат}$ . Вследствие этого напряжение на контактных кольцах изменится от  $\tilde{U}'$  до  $\tilde{U}''$  и соответственно изменится преобразованное напряжение. Этим методом можно регулировать напряжение в пределах  $\pm 10\%$  от номинального. В некоторых случаях эти пределы можно увеличить до  $\pm 15\%$  при значительном уменьшении  $\cos \varphi$  и мощности преобразователя. Напряжение на кольцах можно также регулировать при помощи регулировочного трансформатора или индукционного регулятора, или комбинацией указанных элементов. Для регулирования со стороны коллектора можно включить последовательно регулировочную машину постоянного тока.

## Литература

- Белов Д. Б., Кордюков В. В., Титар А. С. Судовые электрические машины — М.: Судостроение, 1972.
- Брускин Д. Э., Зохорович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины — М.: Высшая школа, 1971.
- Важнов А. И. Электрические машины. — М.: Энергия, 1969.
- Вольдек А. И. Электрические машины. — М.: Энергия, 1974.
- Зимин В. И. Обмотки электрических машин. — М.: Энергия, 1970.
- Китаев В. Е. Трансформаторы. — М.: Высшая школа, 1972.
- Кононенко Е. В., Сипайлов Г. А., Хорьков К. А. Электрические машины. — М.: Высшая школа, 1975.
- Копылов И. П. Электромеханические преобразователи энергии. — М.: Энергия, 1973.
- Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины, ч. I. — М.: Энергия, 1972.
- Петров Г. Н. Электрические машины, ч. I. — М.: Энергия, 1974.

## Раздел III

|           |                                                                            |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|----|
|           | Общие вопросы теории машин переменного тока                                | 3  |
| Глава 17. | Основные типы машин переменного тока и их устройство . .                   | 3  |
| § 17.1.   | Общие сведения . . . . .                                                   | 3  |
| § 17.2.   | Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя . . . . . | 5  |
| § 17.3.   | Принцип действия и устройство синхронных машин . . . . .                   | 8  |
| Глава 18. | Обмотки машин переменного тока и их э. д. с. . . . .                       | 10 |
| § 18.1.   | Основные элементы обмоток машин переменного тока                           | 10 |
| § 18.2.   | Однослойные обмотки с полным шагом и их э. д. с. . . .                     | 13 |
| § 18.3.   | Двухслойные обмотки с укороченным шагом и их э. д. с. . . . .              | 17 |
| Глава 19. | Намагничивающая сила обмотки машины переменного тока                       | 21 |
| § 19.1.   | Распределение намагничивающей силы в пространстве                          | 21 |
| § 19.2.   | Намагничивающая сила однофазной обмотки . . . . .                          | 22 |
| § 19.3.   | Намагничивающая сила двухфазной и трехфазной обмоток . . . . .             | 23 |

## Раздел IV

## Асинхронные машины

|           |                                                                                              |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Глава 20. | Трехфазная асинхронная машина при неподвижном роторе                                         | 26 |
| § 20.1.   | Холостой ход асинхронной машины . . . . .                                                    | 26 |
| § 20.2.   | Короткое замыкание асинхронной машины . . . . .                                              | 27 |
| § 20.3.   | Индукционный регулятор . . . . .                                                             | 29 |
| Глава 21. | Работа асинхронной машины при вращающемся роторе . . .                                       | 31 |
| § 21.1.   | Скольжение, частота тока, ток и э. д. с. обмотки вращающегося ротора . . . . .               | 31 |
| § 21.2.   | Векторная диаграмма и эквивалентная схема асинхронного двигателя . . . . .                   | 33 |
| § 21.3.   | Работа асинхронной машины генератором и тормозом                                             | 37 |
| Глава 22. | Электромагнитный момент и рабочие характеристики асинхронного двигателя . . . . .            | 39 |
| § 22.1.   | Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя . . .                                        | 39 |
| § 22.2.   | Электромагнитный момент асинхронной машины . . .                                             | 40 |
| § 22.3.   | Пусковой и максимальный моменты асинхронного двигателя . . . . .                             | 42 |
| § 22.4.   | Рабочие характеристики асинхронного двигателя . . .                                          | 43 |
| Глава 23. | Круговая диаграмма асинхронной машины . . . . .                                              | 45 |
| § 23.1.   | Обоснование и построение круговой диаграммы . . . .                                          | 45 |
| § 23.2.   | Определение рабочих характеристик асинхронного двигателя по его круговой диаграмме . . . . . | 47 |
| § 23.3.   | Уточненная круговая диаграмма . . . . .                                                      | 50 |
| Глава 24. | Пуск и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей                                 | 51 |
| § 24.1.   | Пуск трехфазных асинхронных двигателей . . . . .                                             | 51 |
| § 24.2.   | Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами                                                 | 53 |
| § 24.3.   | Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей . . . . .                   | 55 |

|                  |                                                              |    |
|------------------|--------------------------------------------------------------|----|
| <b>Глава 25.</b> | <b>Однофазные асинхронные двигатели</b>                      | 57 |
| § 25.1.          | Рабочий процесс однофазного асинхронного двигателя           | 57 |
| § 25.2.          | Пуск однофазных асинхронных двигателей                       | 60 |
| § 25.3.          | Конденсаторные двигатели                                     | 64 |
| <b>Глава 26.</b> | <b>Специализированные асинхронные машины</b>                 | 68 |
| § 26.1.          | Исполнительный асинхронный двигатель с полым ротором         | 68 |
| § 26.2.          | Гистерезисный двигатель                                      | 70 |
| § 26.3.          | Однофазный индукционный регулятор и поворотный трансформатор | 72 |
| § 26.4.          | Синхронная связь асинхронных машин                           | 74 |
| § 26.5.          | Устройство контактных сельсинов                              | 76 |
| § 26.6.          | Рабочий процесс синхронной передачи угла                     | 77 |
| § 26.7.          | Бесконтактные сельсины                                       | 80 |

## Раздел V

### Синхронные машины

|                  |                                                                      |     |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 27.</b> | <b>Общие сведения</b>                                                | 82  |
| § 27.1.          | Принцип действия синхронной машины                                   | 82  |
| § 27.2.          | Основные элементы конструкции синхронных машин                       | 84  |
| <b>Глава 28.</b> | <b>Реакция якоря синхронного генератора</b>                          | 92  |
| § 28.1.          | Основные понятия                                                     | 92  |
| § 28.2.          | Реакция якоря при активной нагрузке                                  | 94  |
| § 28.3.          | Реакция якоря при индуктивной, реактивной и смешанной нагрузках      | 95  |
| § 28.4.          | Особенности реакции якоря в неявнополюсном генераторе                | 97  |
| § 28.5.          | О моменте синхронной машины                                          | 98  |
| <b>Глава 29.</b> | <b>Векторные диаграммы э. д. с. синхронного генератора</b>           | 99  |
| § 29.1.          | Основная диаграмма э. д. с. (диаграмма Blondеля)                     | 100 |
| § 29.2.          | Преобразованная диаграмма э. д. с.                                   | 102 |
| § 29.3.          | Упрощенная диаграмма э. д. с. и синхронное индуктивное сопротивление | 103 |
| § 29.4.          | Практическая диаграмма э. д. с.                                      | 104 |
| § 29.5.          | Система относительных единиц                                         | 106 |
| <b>Глава 30.</b> | <b>Характеристики и параметры трехфазного синхронного генератора</b> | 106 |
| § 30.1.          | Характеристики холостого хода                                        | 106 |
| § 30.2.          | Параметры генератора                                                 | 110 |
| § 30.3.          | Потери и к. п. д. синхронного генератора                             | 113 |
| <b>Глава 31.</b> | <b>Параллельная работа синхронных генераторов</b>                    | 115 |
| § 31.1.          | Включение на параллельную работу                                     | 115 |
| § 31.2.          | Электромагнитная мощность                                            | 119 |
| § 31.3.          | Параллельная работа генератора с сетью бесконечно большой мощности   | 121 |
| § 31.4.          | Устойчивость и колебания генератора при параллельной работе          | 125 |
| <b>Глава 32.</b> | <b>Работа синхронной машины в режиме двигателя и компенсатора</b>    | 128 |
| § 32.1.          | Синхронный двигатель                                                 | 128 |
| § 32.2.          | Реактивный синхронный двигатель                                      | 134 |
| § 32.3.          | Синхронный компенсатор                                               | 136 |
| <b>Глава 33.</b> | <b>Переходные процессы в синхронных машинах</b>                      | 137 |
| § 33.1.          | Определение и виды внезапного короткого замыкания                    | 137 |
| § 33.2.          | Трехфазное короткое замыкание                                        | 138 |
| <b>Глава 34.</b> | <b>Возбуждение синхронных генераторов</b>                            | 146 |
| § 34.1.          | Основные сведения                                                    | 146 |
| § 34.2.          | Генераторы с независимым возбуждением                                | 147 |



|           |                                                    |     |
|-----------|----------------------------------------------------|-----|
|           | § 34.3. Генераторы с самовозбуждением . . . . .    | 149 |
|           | § 34.4. Синхронные индукторные машины . . . . .    | 151 |
| Глава 35. | Нагревание и охлаждение синхронных машин . . . . . | 153 |
|           | § 35.1. Нагревание синхронных машин . . . . .      | 153 |
|           | § 35.2. Охлаждение синхронных машин . . . . .      | 155 |

## Раздел VI

### Коллекторные машины переменного тока и электромашинные преобразователи

|                      |                                                                                                      |     |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 36.            | Однофазные коллекторные двигатели переменного тока . . . . .                                         | 161 |
|                      | § 36.1. Принцип действия и устройство однофазного коллекторного двигателя переменного тока . . . . . | 161 |
|                      | § 36.2. Векторная диаграмма однофазного коллекторного двигателя . . . . .                            | 163 |
|                      | § 36.3. Вращающий момент и характеристики однофазного коллекторного двигателя . . . . .              | 166 |
| Глава 37.            | Трехфазные коллекторные двигатели . . . . .                                                          | 168 |
|                      | § 37.1. Принцип введения добавочной э. д. с. во вторичный контур асинхронного двигателя . . . . .    | 168 |
|                      | § 37.2. Коллектор как преобразователь частоты и фазы . . . . .                                       | 171 |
|                      | § 37.3. Трехфазные коллекторные двигатели параллельного возбуждения . . . . .                        | 173 |
|                      | § 37.4. Компенсированные и синхронизированные асинхронные двигатели и фазокомпенсаторы . . . . .     | 174 |
| Глава 38.            | Электромашинные преобразователи . . . . .                                                            | 176 |
|                      | § 38.1. Основные сведения . . . . .                                                                  | 176 |
|                      | § 38.2. Одноякорный преобразователь . . . . .                                                        | 177 |
| Литература . . . . . |                                                                                                      | 181 |

*Валентин Евгеньевич Китаев,  
Юрий Михайлович Корхов,  
Владимир Константинович Свирин*

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

### Часть II

### МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Редактор В. И. Петухова. Художник В. З. Казакевич. Художественный редактор Н. К. Гуторов. Технический редактор Н. А. Витюкова. Корректор С. К. Марченко  
ИБ № 1075

Изд. № СТД—269. Сдано в набор 10.03.78. Подп. в печать 24.07.78. Т—10177 Формат 60×90<sup>1/16</sup>.  
Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 11,5 усл. п. л.  
11,83 уч.-изд. л. Тираж 40 000 экз. Зак. 301. Цена 40 коп.  
Издательство «Высшая школа», Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
Хохловский пер., 7.